

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۲۳

یک روش تطبیقی برای تقسیم دقیق بارهای هارمونیکی و نامتعادل در ریزشبکه‌های جزیره‌ای

رضا غنی‌زاده^{۱*}، گیورگ قره‌پتیان^۲

^۱ استادیار گروه برق، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

r.ghanizadeh@iaurmia.ac.ir

^۲ استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

grptian@aut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک روش برای تقسیم دقیق بارهای هارمونیکی و نامتعادل در ریزشبکه‌های جزیره‌ای پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی می‌تواند بر اساس قاعده جریان‌های چرخشی و توان‌های هارمونیکی و نامتعادل تأمین‌شده توسط هر واحد تولید پراکنده (DG)، به صورت تطبیقی، تقسیم بار بین DGها را بهبود بخشد. در مقایسه با روش‌های پیشنهادی قبلی، روش پیشنهادی نیازی به یک کنترل‌کننده مرکزی اختصاصی ندارد و ارتباطات فقط بین DGهای مجاور مورد نیاز است. همچنین در این روش، نیازی به داشتن اطلاعات از مقادیر امپدانس فیدر DGها و وضعیت بارگذاری نیست و اثر روش پیشنهادی روی کیفیت ولتاژ خروجی DGها نیز کمتر خواهد بود. فرایند طراحی روش پیشنهادی به طور کامل تشریح گردیده و به منظور نشان دادن کارایی آن، مطالعات شبیه‌سازی بر روی یک ریزشبکه جزیره‌ای نمونه در محیط Matlab/Simulink انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: تولید پراکنده، ریزشبکه، تقسیم بار، جریان چرخشی، بارهای هارمونیکی و نامتعادل.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، افزایش رشد مصرف انرژی الکتریکی، آلودگی محیط زیست، هزینه‌های احداث خطوط انتقال جدید و تلفات ناشی از آن، باعث حرکت به سمت تولید انرژی از طریق منابع کوچک، به نام تولید پراکنده^۱ (DG) شده است. افزایش حضور منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، ساختار جدیدی به نام ریزشبه^۲ به وجود آورده است. ریزشبه‌ها در دو وضعیت متصل به شبکه اصلی و جزیره‌ای^۳ می‌توانند مورد بهره‌برداری قرار گیرند [۱ و ۲].

در ریزشبه‌های جزیره‌ای، علاوه بر کنترل ولتاژ و فرکانس، بار کل مورد تقاضا بایستی به‌طور متناسب با توان نامی DGها، بین آن‌ها تقسیم شود. به‌منظور دستیابی به این اهداف، اینورتر DGها از طریق کنترلرهای افی^۴ فرکانس - توان اکتیو ($P-w$) و دامنه ولتاژ- توان راکتیو ($Q-E$) مدیریت می‌شوند [۳ و ۴]. با این حال، این کنترلرهای افی با وجود بارهای غیرخطی متعادل و نامتعادل و عدم تساوی امپدانس فیدر DGها، عملکرد ضعیفی در تقسیم جریان بار در فرکانس‌های مختلف دارند و نمی‌توانند مستقیماً با مشکل چرخش این جریان‌ها میان DGها مقابله کنند.

در تحقیقات گذشته، روش‌هایی به‌منظور بهبود تقسیم بار در ریزشبه‌ها ارائه شده است. در مرجع [۵]، یک روش کنترل افی تطبیقی مبتنی بر امپدانس مجازی برای بهبود تقسیم توان پیشنهاد شده است. در مرجع [۶]، یک کنترلر افی زاویه اصلاح‌شده به‌منظور تقسیم توان به‌گونه‌ای طراحی شده است که اثر اندوکتانس فیدر DG روی تقسیم حذف شود. علاوه بر این، ضرایب محاسبه‌شده برای کنترلر افی، پایین بوده و پایداری سیستم بهبود داده شده است. در مراجع [۷ و ۸]، یک طرح کنترلر افی هارمونیکی برای کاهش هارمونیک‌های ولتاژ نقطه اتصال مشترک^۵ (PCC) و تقسیم توان هارمونیکی بین اینورترهای موازی کنترل‌شده با روش افی کلاسیک پیشنهاد شده است. در مرجع [۹] از طرح‌های کنترل‌کننده‌های افی هارمونیکی و عدم تعادل برای تقسیم توان‌های هارمونیکی و عدم تعادل میان DGها و بهبود کیفیت ولتاژ PCC استفاده شده است. علاوه بر این، یک پروتکل اجماع توزیع‌شده^۶ برای تنظیم امپدانس

مجازی^۷ در فرکانس‌های اصلی و هارمونیکی و یک روش مبتنی بر اجماع پویا^۸ برای بازیابی ولتاژ استفاده شده است. در مرجع [۱۰]، به‌منظور بهبود تقسیم نامناسب توان بار بین DGهای یک ریزشبه جزیره‌ای، یک روش کنترل افی پیشرفته از طریق تنظیم آنالین امپدانس مجازی پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۱]، یک طرح امپدانس مجازی تطبیقی در یک ریزشبه چندبازه ارائه شده است که در شرایط تغییر بار، تقسیم دقیق توان هارمونیکی میان DGهای ریزشبه را فراهم می‌کند. در مرجع [۱۲]، یک روش ترکیبی متشکل از ادیتانس مجازی و کنترلرهای تکراری^۹ (RC) برای تقسیم بار و جبران‌سازی مؤلفه‌های هارمونیکی ولتاژ ارائه شده است. مزیت اصلی این روش این است که فقط یک RC برای جبران تمامی مؤلفه‌های هارمونیکی مورد نیاز است که منجر به کاهش محاسبات و پیچیدگی‌های سیستم کنترل شده است. در مرجع [۱۳]، یک طرح ادیتانس مجازی برای کاربرد در اینورترهای منبع ولتاژ مد کنترل ولتاژ^{۱۱} (VSI-VCM) و مد کنترل جریان^{۱۱} (VSI-CCM) به‌منظور جبران‌سازی هارمونیکی‌های ولتاژ و تقسیم بار پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۴]، یک طرح امپدانس مجازی برای بهبود افت ولتاژ و تقسیم توان‌های اکتیو و راکتیو و کاهش جریان چرخشی بین DGهای ریزشبه ارائه شده است. در مرجع [۱۵]، برای تقسیم توان هارمونیکی یک طرح امپدانس مجازی هارمونیکی پیشنهاد شده و برای تخمین مقدار امپدانس آن از روش افی $Z_{ii}-H$ استفاده شده است. در مرجع [۱۶]، به‌منظور تقسیم جریان بار و جبران‌سازی هارمونیکی‌ها و عدم تعادل ولتاژ، روشی مبتنی بر توابع هزینه پیشنهاد شده است. توابع هزینه پیشنهادی با استفاده از کنترل پیش بین مدل کنترل پیوسته^{۱۲} (CCS-MPC) بهینه‌سازی شده‌اند. در مرجع [۱۷]، یک طرح کنترل سلسله‌مراتبی^{۱۳} برای بهبود کیفیت ولتاژ و تقسیم بار پیشنهاد شده است. در این طرح توان هارمونیکی بار با استفاده از شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی^{۱۴} محاسبه شده و برای تقسیم آن از یک طرح امپدانس مجازی بهره گرفته شده است. در مرجع [۱۸]، یک طرح امپدانس مجازی در توالی منفی برای تقسیم توان نامتعادل پیشنهاد و برای تنظیم پارامترهای آن از الگوریتم اجماع^{۱۵} استفاده شده است. در مرجع [۱۹]، یک طرح امپدانس خازنی مجازی برای

7. Virtual Impedance
8. Dynamic Consensus
9. Repetitive Controller
10. Voltage Source Inverters of Voltage Control Mode
11. Voltage Source Inverters of Current Control Mode
12. Continuous-Control-Set Model Predictive Control
13. Hierarchical Control
14. Radial Basis Function Neural Network
15. Consensus Algorithm

1. Distributed Generation
2. Microgrid
3. Islanded Mode
4. Droop Controllers
5. Point of Common Coupling
6. Distributed Consensus Protocol

بر اساس قاعده جریان‌های چرخشی و توان‌های هارمونیک و نامتعادل تأمین شده توسط هر DG، تقسیم بار بین DGها را بهبود دهد. در مقایسه با طرح‌های تقسیم بار قبلی که تقسیم مؤلفه‌های جریان بار به قیمت افت ولتاژ و اغتشاش‌های هارمونیک اضافی محقق می‌شد، اثر کنترل پیشنهادی روی دامنه و کیفیت شکل موج ولتاژ خروجی DGها ناچیز خواهد بود. همچنین، این روش می‌تواند خطای تقسیم مؤلفه‌های جریان بار را بدون اطلاع از ساختار ریزشبهه مانند امپدانس فیدر DGها و شرایط بارگذاری، جبران‌سازی نماید. علاوه بر این، روش پیشنهادی به یک کنترل‌کننده مرکزی اختصاصی نیاز ندارد و ارتباطات فقط بین DGهای مجاور مورد نیاز است.

۲. ساختار کنترل محلی DGهای ریزشبهه

جزئیات طبقه قدرت و ساختار کنترلر محلی DGهای یک ریزشبهه جزیره‌ای در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر DG به واسطه یک مبدل الکترونیک قدرت و از طریق فیلترهای LC و امپدانس فیدر Z_{feeder} به PCC متصل شده‌اند. علاوه بر این، ریزشبهه شامل بارهای خطی و غیرخطی متعادل و نامتعادل است که به صورت مشترک در PCC در نظر گرفته شده‌اند. در این وضعیت، جریان خروجی DGها دارای توالی مثبت و منفی مؤلفه اصلی و هارمونیک‌های فرد (۳، ۵، ۷ و...) خواهد بود. توجه شود که در شرایط متعادل، هارمونیک سوم در توالی صفر قرار می‌گیرد، اما در شرایط نامتعادل، این هارمونیک دارای توالی مثبت و منفی خواهد بود [۲۶].

ساختار کنترل محلی DGها در قاب مرجع ساکن ($\alpha\beta$) طراحی و پیاده‌سازی شده است که شامل کنترلرهای افی توان‌های توالی مثبت مؤلفه اصلی، امپدانس مجازی توالی مثبت مؤلفه اصلی و کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان مؤلفه‌های اصلی و هارمونیک هستند. همچنین یک جبران‌ساز به منظور بهبود تقسیم توالی منفی مؤلفه اصلی و توالی مثبت و منفی مؤلفه‌های هارمونیک جریان بار به این ساختار اضافه شده است. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، توالی مثبت و منفی مؤلفه‌های اصلی و هارمونیک جریان خروجی DGها به صورت انتخابی در قاب مرجع dq استخراج شده و از طریق یک لینک ارتباطی با عرض باند پایین^۸ (LBC) به کنترل‌کننده‌های ثانویه ارسال می‌شوند. در شبیه‌سازی فرض شده است که انتقال اطلاعات از طریق LBC، دارای تأخیر 1ms باشد.

کاهش هارمونیک‌های ولتاژ و تقسیم جریان‌های هارمونیک بار بین DGهای یک ریزشبهه پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۰] از یک کنترل‌کننده مقاوم H_∞ به منظور ردیابی مرجع ولتاژ در و تقسیم بار میان DGها استفاده شده است. علاوه بر این، مسئله طراحی کنترل H_∞ با دیگر روش‌های کنترلی، مانند کنترل بهینه محدود و جایابی قطب منطقه‌ای^۱، برای رسیدن به هدف کنترل بهینه و بهبود پاسخ گذرای مطلوب ترکیب شده است. در مرجع [۲۱]، از حلقه کنترلر ولتاژ دوگانه اصلاح‌شده^۲ برای افزایش قابلیت تقسیم توان در ریزشبهه‌های جزیره‌ای بدون دخالت کنترلر افی ارائه شده است. در این روش یک حلقه کنترلی در کنترل‌کننده مرکزی ریزشبهه برای تنظیم دامنه ولتاژ و فرکانس و کاهش هارمونیک‌های ولتاژ و از یک حلقه کنترلی داخلی اصلاح‌شده برای تقسیم بار استفاده شده است. در مرجع [۲۲]، یک استراتژی کنترلی برای تقسیم بار در یک ریزشبهه متصل به شبکه اصلی پیشنهاد شده است. استراتژی کنترل ارائه‌شده شامل یک طرح کنترلی مبتنی تابع لیپانوف^۳ برای جبران خطای تقسیم توالی منفی مؤلفه‌های جریان ناشی از بارهای نامتعادل و یک طرح کنترلی مبتنی بر مد لغزشی^۴ برای تقسیم دقیق توان اکتیو و راکتیو بین DG می‌باشد. در مرجع [۲۳]، یک سیگنال ولتاژ هارمونیک فرکانس بالا به مرجع ولتاژ خروجی هر واحد DG برای کاهش خطای تقسیم جریان‌های هارمونیک بار، تزریق شده است. با اعمال این سیگنال، تقسیم توان دقیقی از طریق تنظیم امپدانس خروجی حلقه بسته هر اینورتر توسط تغییر پهنای باند حلقه کنترلر ولتاژ به دست می‌آید. در مرجع [۲۴]، یک استراتژی کنترلی بر اساس تخمین خطای تقسیم توان به وسیله تزریق یک ترم کوپلینگ اغتشاش گذرای کوچک^۵ توان اکتیو-راکتیو پیشنهاد شده است. سپس، خطای تقسیم توان با استفاده از ترم کنترل انتگرال‌گیر حذف می‌شوند. در مرجع [۲۵]، یک طرح کنترل سلسله‌مراتبی به منظور بهبود تقسیم توان پیشنهاد شده است. در این ساختار، از فناوری زمان‌بندی GPS برای هماهنگ کردن زاویه‌های مرجع محلی^۶ و از پروتکل اجماعی^۷ برای بهبود تقسیم توان استفاده شده است.

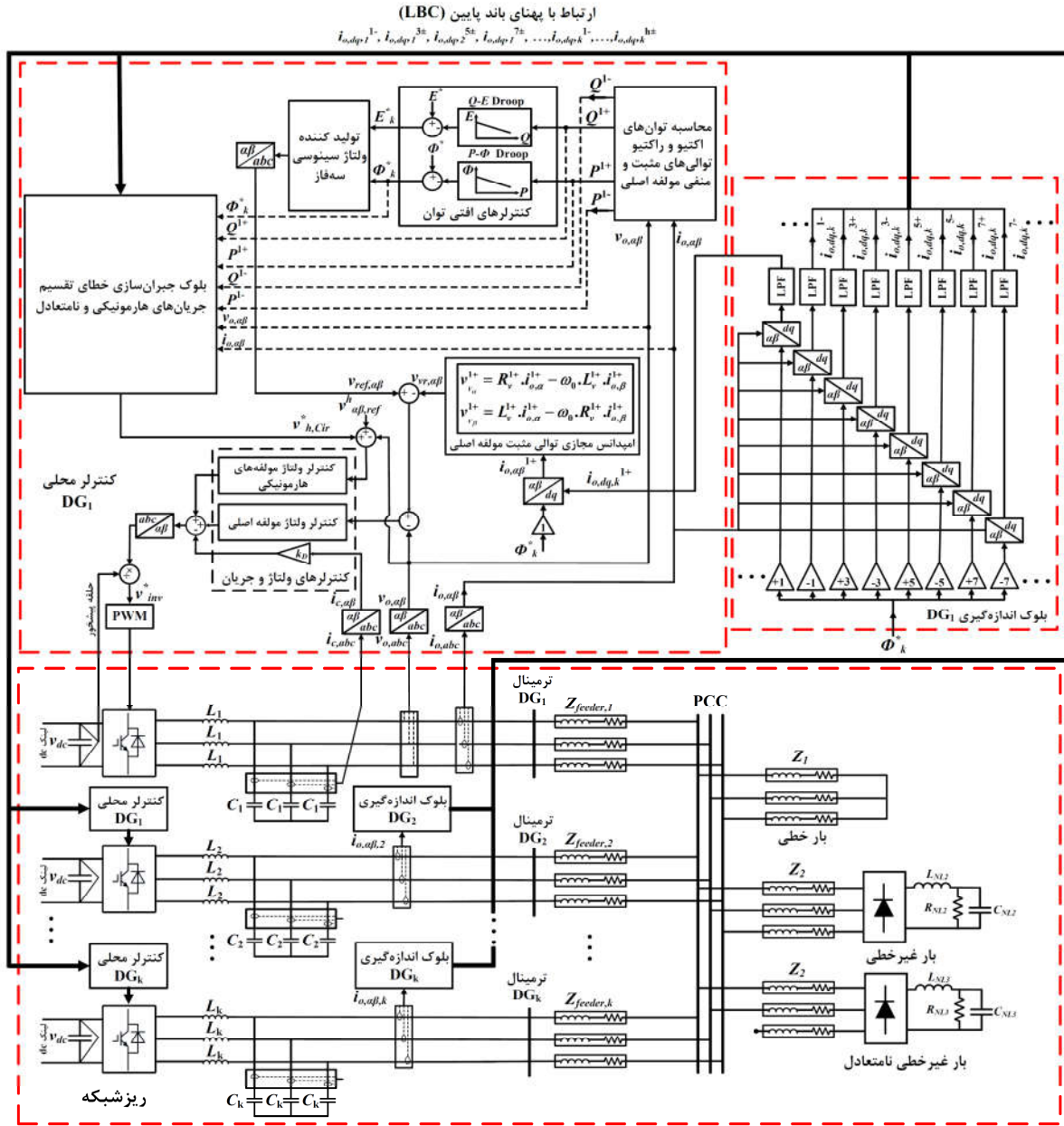
در این مقاله، یک روش جدید برای جبران‌سازی خطای تقسیم جریان‌های هارمونیک و نامتعادل بار میان DGها در ریزشبهه‌های جزیره‌ای پیشنهاد شده است. این روش می‌تواند به صورت تطبیقی و

1. Constrained Optimal Control and Regional Pole Placement
2. Modified Double-Loop Voltage Controller
3. Lyapunov Function
4. Slip Mode
5. Small Transient Coupling Term
6. Local Reference Angles
7. Consensus Protocol

8. Low Bandwidth Communication

یک روش تطبیقی برای تقسیم دقیق بارهای هارمونیکی و نامتعادل در ریزشکله‌های جزیره‌ای ۵

بالونیس‌های ± 1 $\pm h$ به ترتیب نشان‌دهنده توالی مثبت و منفی جبران‌سازی به صورت انتخابی برای هارمونیک‌های غالب (۳، ۵ و مؤلفه‌های اصلی و هارمونیک h/m هستند. شایان ذکر است (۷) جریان انجام شود.



شکل (۱): ساختار طبقه‌های قدرت و کنترلی یک ریزشکله جزیره‌ای

نامی فرکانس زاویه‌ای، ϕ^* مرجع زاویه فاز ولتاژ خروجی، m_p^{1+} و m_i^{1+} به ترتیب ضرایب تناسبی و انتگرالی توان‌های اکتیو و راکتیو توالی مثبت مؤلفه اصلی، E_0 اندازه ولتاژ خروجی، E^* اندازه ولتاژ مرجع، P^{1+} و Q^{1+} به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو توالی مثبت مؤلفه اصلی هستند.

بر اساس مراجع [۲۸-۳۰]، توان‌های توالی‌های مثبت و منفی مؤلفه اصلی را می‌توان توسط روابط زیر به دست آورد.

$$P^\pm = v_{o,\alpha}^\pm i_{o,\alpha}^\pm + v_{o,\beta}^\pm i_{o,\beta}^\pm \quad (۳)$$

۲.۱. کنترل‌های اکتیو توان‌های اکتیو و راکتیو توالی مثبت مؤلفه اصلی

کنترل توان‌های توالی مثبت مؤلفه اصلی بر اساس کنترل‌کننده‌های اکتیو و راکتیو توالی مثبت مؤلفه اصلی می‌شود [۲۷، ۲۸].

$$\phi^* = \frac{\omega^*}{s} = \frac{\omega_0}{s} - (m_p^{1+} + \frac{m_i^{1+}}{s})P^{1+} \quad (۱)$$

$$E^* = E_0 - n_p^{1+} Q^{1+} \quad (۲)$$

در این روابط، s متغیر لاپلاس، ω_0 و ω^* به ترتیب مقادیر مرجع

۲.۴. جبران ساز خطای تقسیم جریان های هارمونیکی

و نامتعادل پیشنهادی

در شکل (۲)، بلوک دیاگرام جبران ساز خطای تقسیم مؤلفه های جریان بار نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود به منظور بهبود تقسیم، در مسیر جریان های چرخشی^۲ توالی منفی مؤلفه اصلی و توالی مثبت و منفی مؤلفه های هارمونیکی، به ترتیب از کنترل کننده تناسبی D_p^{1-} و $D_p^{h\pm}$ استفاده شده است. جریان های چرخشی توالی منفی مؤلفه اصلی ($i_{Cir,k}^{1-}$) و توالی مثبت و منفی مؤلفه های هارمونیکی ($i_{Cir,k}^{h\pm}$) میان چند اینورتر موازی سه فاز را می توان به صورت روابط زیر محاسبه کرد.

$$i_{Cir,k}^{1-} = i_{o,dq,k}^{1-} - h_k \sum_{k=1}^N i_{o,dq,k}^{1-} \quad (11)$$

$$i_{Cir,k}^{h\pm} = i_{o,dq,k}^{h\pm} - h_k \sum_{k=1}^N i_{o,dq,k}^{h\pm}, \quad h = 3, 5, 7, \dots \quad (12)$$

در روابط بالا، h_k فاکتور توزیع بار است که متناسب با توان نامی DGهاست. فاکتور توزیع بار^۳ به صورت زیر تعریف می شود.

$$h_k = \frac{S_{0,k}}{S_T} = \frac{S_{0,k}}{\sum_{k=1}^N S_{0,k}} \quad (13)$$

که S_T و $S_{0,k}$ به ترتیب توان نامی DG_k و بارگذاری کل توان DGها هستند.

در شکل (۲)، مقدار D_p^{1-} بر مبنای میزان توان نامتعادل مؤلفه اصلی (S^{1-}) و مقدار $D_p^{h\pm}$ بر مبنای توان های غیرمؤلفه اصلی متعادل و نامتعادل تأمین شده توسط هر DG ($S_n^{h\pm}$) تعیین می شوند. مقدار این کنترل کننده ها بر اساس روابط زیر محاسبه می شوند:

$$D_p^{1-} = k_p \cdot S^{1-} \quad (14)$$

$$D_p^{h+} = k_p \cdot S_n^{h+} \quad (15)$$

$$D_p^{h-} = k_p \cdot S_n^{h-} \quad (16)$$

در روابط بالا، k_p یک ثابت کوچک مثبت است که بر مبنای توان نامی DGها تعیین می شود، به طوری که DG با توان بیشتر، k_p کوچک تری دارد. بر اساس مرجع [۳۰]، S^{1-} و $S_n^{h\pm}$ به صورت روابط زیر قابل محاسبه اند.

$$S^{1\pm} = \sqrt{(P^{1\pm})^2 + (Q^{1\pm})^2} \quad (17)$$

$$S_n^{h\pm} = S^{1\pm} \cdot \sqrt{(THD_I^{\pm})^2 + (THD_V^{\pm})^2} \quad (18)$$

که THD_I^{\pm} و THD_V^{\pm} به ترتیب بیانگر، توالی های مثبت و منفی

$$q^{\pm} = v_{o,\alpha}^{\pm} i_{o,\beta}^{\pm} - v_{o,\beta}^{\pm} i_{o,\alpha}^{\pm} \quad (4)$$

$$P^{1\pm} = p^{\pm} \cdot LPF(s) \quad (5)$$

$$Q^{1\pm} = q^{\pm} \cdot LPF(s) \quad (6)$$

که $v_{o,\alpha\beta}^{\pm}$ و $i_{o,\alpha\beta}^{\pm}$ به ترتیب توالی های مثبت و منفی ولتاژ و جریان خروجی DGها هستند. در مرجع [۳۱] نحوه استخراج آن ها شرح داده شده است. p^{\pm} و q^{\pm} به ترتیب توالی های مثبت و منفی توان های اکتیو و راکتیو لحظه ای و LPF فیلتر پایین گذر مرتبه دوم هستند.

۲.۲. امپدانس مجازی توالی مثبت مؤلفه اصلی

امپدانس خروجی اینورترها نقش مهمی در بهبود عملکرد مشخصه های اکتیو به منظور تقسیم توالی مثبت مؤلفه اصلی توان های اکتیو و راکتیو دارند. بر این اساس، اندوکتانس مجازی در فرکانس اصلی اضافه می شود تا امپدانس خروجی DG و در نتیجه امپدانس کل سیستم را سلفی تر نماید. همچنین اضافه کردن مقاومت مجازی به میراسازی نوسانات در ریزش شبکه کمک می کند. امپدانس مجازی از طریق اصلاح مرجع ولتاژ خروجی اینورترها با استفاده از یک حلقه پیش خور جریان بار محقق می شود [۴ و ۳۲] و به صورت روابط زیر بیان می شود.

$$v_{v\alpha}^{1+} = R_v^{1+} \cdot i_{o,\alpha}^{1+} - \omega_0 \cdot L_v^{1+} \cdot i_{o,\beta}^{1+} \quad (7)$$

$$v_{v\beta}^{1+} = \omega_0 \cdot L_v^{1+} \cdot i_{o,\alpha}^{1+} + R_v^{1+} \cdot i_{o,\beta}^{1+} \quad (8)$$

که R_v^1 و L_v^1 به ترتیب مقاومت و اندوکتانس مجازی توالی مثبت مؤلفه اصلی هستند.

۲.۳. کنترل کننده های ولتاژ مؤلفه های اصلی و هارمونیکی

به منظور تضمین ردیابی دقیق ولتاژ می توان از کنترل کننده های تناسبی-رزونانسی^۱ (PR) بیان شده در روابط (۹) و (۱۰) استفاده کرد. همچنین از یک حلقه کنترل تناسبی ساده k_D می توان برای بهبود عملکرد میرایی و دینامیکی سیستم DG که از جریان خازن فیلتر فیدبک گرفته می شود [۳۳-۳۵] بهره برد.

$$G_{vf}(s) = k_{pV} + \frac{2 \cdot k_{rV} \cdot \omega_{cV} \cdot s}{s^2 + 2 \cdot \omega_{cV} \cdot s + (\omega_0)^2} \quad (9)$$

$$G_{vh}(s) = k_{pV} + \sum_{h=3,5,7} \frac{2 \cdot k_{rV} \cdot \omega_{cV} \cdot s}{s^2 + 2 \cdot \omega_{cV} \cdot s + (h\omega_0)^2} \quad (10)$$

که $G_{vh}(s)$ و $G_{vf}(s)$ به ترتیب کنترل های PR مؤلفه اصلی و هارمونیکی های انتخابی است. k_{pV} و k_{rV} به ترتیب ضرایب تناسبی مؤلفه های اصلی و هارمونیکی و ω_c و ω_0 به ترتیب فرکانس قطع و فرکانس زاویه ای مرجع این کنترل کننده ها هستند.

۷ یک روش تطبیقی برای تقسیم دقیق بارهای هارمونیکی و نامتعادل در ریزشبکه‌های جزیره‌ای

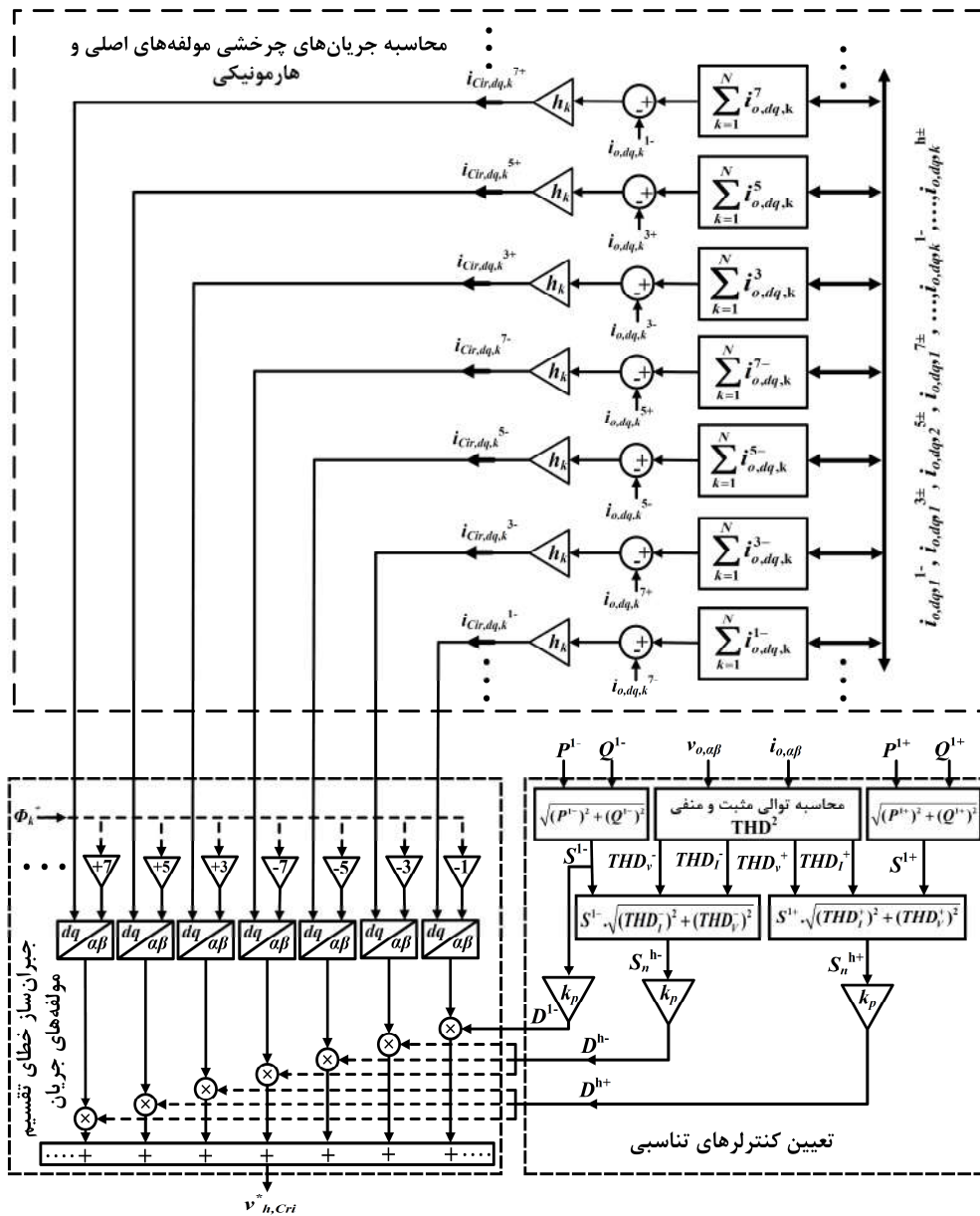
می‌یابند. بنابراین، از افزایش بیش از حد مقدار بار غیرخطی متعادل و نامتعادل تأمین‌شده توسط هر DG جلوگیری شده و تقسیم بار به‌طور متناسب با ظرفیت نامی DG‌ها صورت می‌پذیرد. برخلاف طرح‌های دیگر تقسیم مانند طرح‌های امپدانس مجازی، اثر این طرح پیشنهادی روی کیفیت شکل موج‌های ولتاژ خروجی DG‌ها پایین خواهد بود. این بدان علت است که طرح‌های امپدانس مرسوم در مسیر کل جریان‌های بارهای خطی و غیرخطی بزرگ اعمال می‌شود، درحالی‌که در طرح پیشنهادی، حلقه‌های جبران‌سازی خطای تقسیم در مسیر فیدبک جریان‌های چرخشی مؤلفه‌های اصلی و هارمونیکی قرار می‌گیرند.

اغتشاش‌های هارمونیکی کل ولتاژ و جریان هستند. این پارامتر توسط روابط زیر قابل محاسبه‌اند.

$$THD_v^{\pm} = \frac{\sqrt{(v_d^{oc\pm})^2 + (v_q^{oc\pm})^2}}{\sqrt{(v_d^{1+})^2 + (v_q^{1+})^2}} \quad (19)$$

$$THD_I^{\pm} = \frac{\sqrt{(i_d^{oc\pm})^2 + (i_q^{oc\pm})^2}}{\sqrt{(i_d^{1+})^2 + (i_q^{1+})^2}} \quad (20)$$

در روابط (۱۴) تا (۱۶)، با افزایش توان‌های S_n^{h+} و S_n^{h-} مقدار کنترل‌کننده‌های تناسبی D_p^{-l} و D_p^{+h} افزایش می‌یابند و این افزایش عاملی محدودکننده برای این توان‌ها خواهد شد؛ زیرا با افزایش کنترل‌کننده‌های تناسبی جریان‌های چرخشی توالی منفی مؤلفه اصلی و توالی منفی و مثبت مؤلفه‌های هارمونیکی کاهش



شکل (۲): ساختار بلوک جبران‌ساز خطای تقسیم جریان‌های هارمونیکی و نامتعادل

۳. تعیین پارامترهای سیستم کنترل

در این مقاله، مطالعه بر روی یک ریزشبهک جزیره‌ای، شامل دو DG با ظرفیت نامی متفاوت (ظرفیت نامی DG₁ دو برابر DG₂ است) انجام گرفته شده است. همچنین جبران‌سازی برای توالی منفی مؤلفه اصلی و توالی مثبت و منفی مؤلفه‌های هارمونیک‌های غالب (۳، ۵ و ۷) انجام شده است. برای تعیین پارامترهای کنترلرهای اقی‌توان‌ها، می‌توان پارامترهای کنترلر اقی‌توان DG₁ را با تحلیل پایداری تعیین کرده و پارامترهای DG₂ را بر اساس توان نامی‌اش تنظیم کرد. در مرجع [۳۶]، برای تعیین این پارامترها تحلیل مشابهی انجام شده است که در اینجا از بیان مجدد آن خودداری می‌شود.

با استفاده از توابع انتقال حلقه بسته مراجع توالی مثبت و منفی ولتاژ مؤلفه‌های اصلی و هارمونیک و امپدانس خروجی معادل حلقه بسته سیستم کنترل می‌توان پارامترهای کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان و امپدانس مجازی مؤلفه اصلی را استخراج کرد. توجه به این نکته لازم است که استخراج توابع حلقه بسته و تابع امپدانس خروجی توالی منفی، مشابه توالی مثبت است؛ با این تفاوت که باید در تمام روابط، تمامی‌ها با s - جایگزین گردند. این توابع به‌صورت روابط زیر بیان می‌شوند:

$$G_{PWM} = \frac{1}{1 + 1.5T_s \cdot s} \quad (21)$$

$$Z_O(s) = Z'_O(s) + Z_V(s) \quad (22)$$

$$Z'_O(s) = \frac{1}{G_{PWM}(s)(G_{vf}(s) + G_{vh}(s)) + G_{PWM}(s)k_D.Cs + (r_L + Ls).Cs + 1} \quad (23)$$

$$G_{CL-f}(s) = \frac{G_{vf}(s).G_{PWM}(s)}{G_{PWM}(s)(G_{vf}(s) + G_{vh}(s)) + G_{PWM}(s)k_D.Cs + (r_L + Ls).Cs + 1} \quad (24)$$

$$G_{CL-h}(s) = \frac{G_{vh}(s).G_{PWM}(s)}{G_{PWM}(s)(G_{vf}(s) + G_{vh}(s)) + G_{PWM}(s)k_D.Cs + (r_L + Ls).Cs + 1} \quad (25)$$

بدون داشتن هیچ تداخلی با حلقه ردیابی مرجع ولتاژ هارمونیک، به‌خوبی دنبال شده است.

۴. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، به‌منظور تأیید صحت عملکرد روش پیشنهادی برای بهبود تقسیم توالی مثبت و منفی مؤلفه‌های جریان بار، شبیه‌سازی در محیط Matlab/Simulink برای یک ریزشبهک جزیره‌ای نشان داده شده در شکل (۴) انجام شده است. ریزشبهک مورد مطالعه شامل دو DG با ظرفیت نامی مختلف هستند که از طریق فیلترهای خروجی LC به PCC متصل شده‌اند. ظرفیت نامی DGها به‌ترتیب $S_{01}=5kVA$ و $S_{02}=2.5kVA$ در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر نامی ولتاژ و فرکانس ریزشبهک به‌ترتیب $230V$ و $50Hz$ می‌باشد. یک یکسوساز دیودی تمام موج سه‌فاز به‌عنوان بار غیرخطی و یک بار خطی با اتصال ستاره (امپدانس هر فاز Z_L) در PCC در نظر گرفته می‌شود. یکی از فازهای بار غیرخطی متصل به PCC قطع شده است که باعث ایجاد اغتشاش جریان نامتعادل در خروجی DGها می‌شود. پارامترهای سیستم و سیستم الکتریکی ریزشبهک مورد مطالعه، به‌ترتیب در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. دو گام شبیه‌سازی برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است:

- در گام اول (0sec ≤ t < 2sec)، DGها با امپدانس مجازی

که $G_{CL-f}(s)$ و $G_{CL-h}(s)$ به‌ترتیب توابع انتقال حلقه بسته مراجع ولتاژ مؤلفه اصلی و هارمونیک، G_{PWM} تابع تبدیل بلوک PWM، T_s زمان نمونه‌برداری، $Z_O(s)$ امپدانس خروجی معادل حلقه بسته سیستم کنترل، $Z_V(s)$ امپدانس مجازی در مؤلفه اصلی و $Z'_O(s)$ امپدانس خروجی مبدل بدون حضور امپدانس مجازی هستند.

در شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب)، دیاگرام‌های بده $G_{CL-f}(s)$ و $G_{CL-h}(s)$ در توالی مثبت و منفی با استفاده از پارامترهای ارائه‌شده در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اندازه $G_{CL-f}(s)$ و $G_{CL-h}(s)$ در توالی‌های مثبت و منفی یکسان است و همان‌طور که انتظار می‌رود، توالی‌های مثبت و منفی در فاز مخالف قرار دارند (۱۸۰ درجه اختلاف فاز). علاوه بر این، اندازه و زاویه فاز توابع تبدیل حلقه بسته در فرکانس اصلی و هارمونیک‌های غالب (مرتبه‌های ۳، ۵ و ۷) به‌ترتیب برابر ۱ و صفر هستند. بنابراین می‌توان گفت که مرجع ولتاژ به‌خوبی دنبال می‌شود. همچنین در شکل (۳-ج) دیده می‌شود که اندازه $Z'_O(s)$ نیز برای هر دو توالی یکسان بوده و همان‌طور که از این شکل مشخص است، مقدار دامنه امپدانس خروجی DG در فرکانس اصلی و هارمونیک‌های غالب تقریباً صفر هستند. بنابراین می‌توان گفت که مرجع ولتاژ

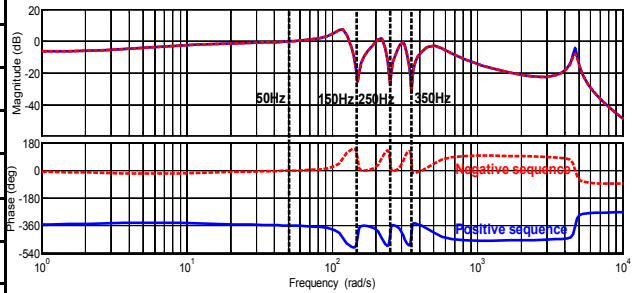
جدول (۱): پارامترهای سیستم کنترل DGها و سیستم الکتریکی ریزشبه‌ جزیره‌ای استفاده‌شده در شبیه‌سازی

| کنترل‌کننده‌های توان اکتیو و راکتیو توالی مثبت مؤلفه اصلی | | |
|---|---|--------------------------------------|
| DG ₁ , DG ₂ | m_p^{1+} (rad/W) | $2 \times 10^{-5}, 4 \times 10^{-5}$ |
| | m_i^{1+} (rad/W.s) | $2 \times 10^{-7}, 4 \times 10^{-7}$ |
| | n_p^{1+} (rad/W) | $1 \times 10^{-1}, 2 \times 10^{-1}$ |
| امپدانس مجازی توالی مثبت مؤلفه اصلی | | |
| DG ₁ , DG ₂ | R_V^{1+} (Ω) | ۰/۲۵, ۰/۵ |
| | L_V^{1+} (mH) | ۲/۵, ۵ |
| جبران‌ساز خطای تقسیم مؤلفه‌های جریان | | |
| DG ₁ , DG ₂ | k_p | ۴/۵, ۹ |
| کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان | k_{pfv}, k_{phv} | ۱, ۵ |
| | k_{rv1}, k_{rv3} | ۱۳۰۰, ۸۰۰ |
| | k_{rv5}, k_{rv7} | ۶۰۰, ۷۰۰ |
| | k_D | ۰/۲ |
| | ω_{CV}/ω_{CI} (rad/s) | ۲ |
| امپدانس فیدر DGها | Z_{l1}, Z_{l2} (Ω -mH) | ۰/۲-۳/۶, ۰/۱-۱/۸ |
| خط توزیع بار خطی | Z (Ω -mH) | ۰/۱-۱/۶ |
| بار خطی | Z_l (Ω -mH) | ۵۰-۲۰ |
| بار غیرخطی نامتعادل | C_{NL} (μ F), R_{NL} (Ω), L_{NL} (mH) | ۰/۰۸۴, ۲۰۰, ۲۳۵ |

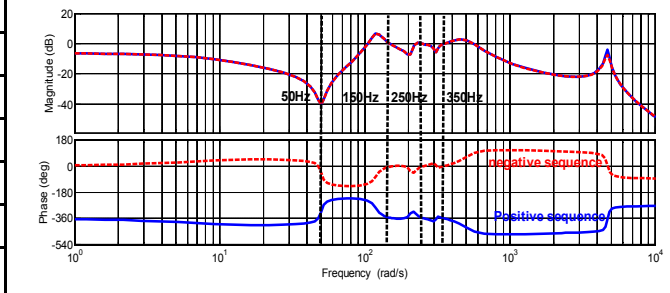
۴. ۱. گام اول

در شکل (۵)، شکل موج ولتاژهای خروجی DGها در گام‌های شبیه‌سازی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در گام اول، قبل از فعال‌سازی حلقه‌های خطای تقسیم توالی مثبت و منفی مؤلفه‌های جریان بار، شکل موج ولتاژهای خروجی DGها تقریباً بدون اغتشاش هارمونیکی هستند. این واقعیت کارایی کنترل‌کننده‌های ولتاژ در دنبال کردن ولتاژ مرجع با حضور بار غیرخطی را نشان می‌دهد. در شکل (۶)، جریان سه فاز خروجی DGها در گام‌های مختلف شبیه‌سازی نشان شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در گام اول با در نظر گرفتن ظرفیت دو برابر DG₁ نسبت به DG₂، جریان بار به‌صورت متناسب با توان نامی DGها بین آنها تقسیم نشده است. این بدان علت است که در این گام، توالی مثبت مؤلفه اصلی جریان بار، به‌علت عملکرد مناسب کنترل‌های افتی توان‌ها (P^{+1} و Q^{+1}) به‌صورت متناسب با توان نامی DGها تقسیم شده است؛ اما توالی منفی مؤلفه اصلی و توالی مثبت و منفی مؤلفه هارمونیکی جریان بار، به‌علت امپدانس کمتر بین DG₂ تا نقطه اتصال بار، بیشتر توسط این DG تأمین می‌شود. این موضوع برای نمونه، در شکل (۷) برای توالی

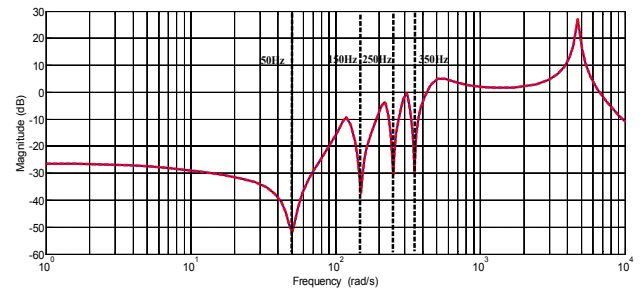
توالی مثبت مؤلفه اصلی کار می‌کنند ولی بلوک جبران‌ساز خطای تقسیم مؤلفه‌های جریان بار فعال نیست. در گام دوم ($2 \text{ sec} \leq t < 3.5 \text{ sec}$)، جبران‌ساز خطای تقسیم توالی مثبت و منفی مؤلفه‌های جریان بار در کنترل محلی DGها فعال می‌شود.



(الف)

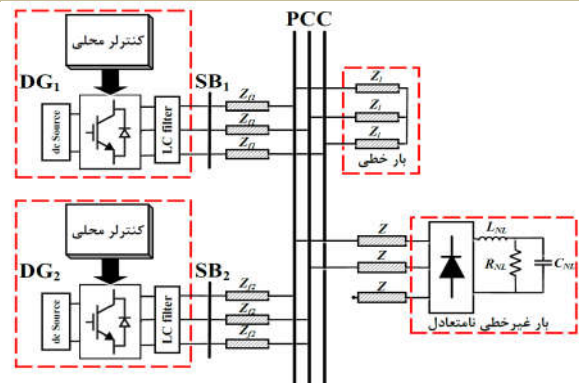


(ب)

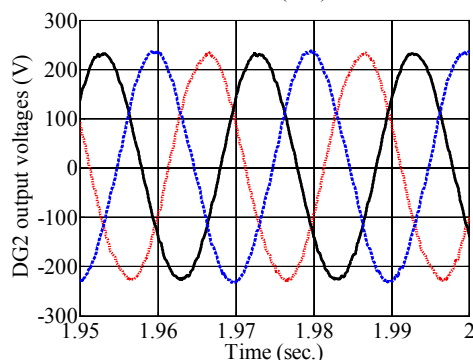
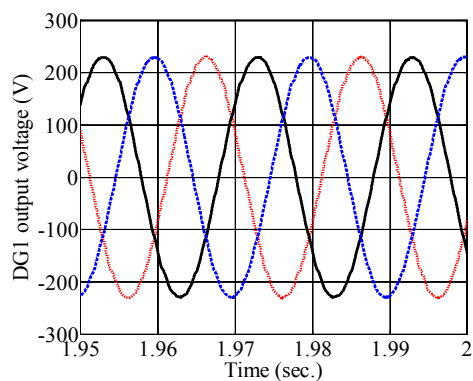


(ج)

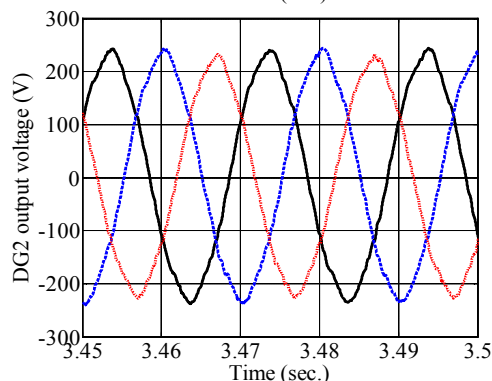
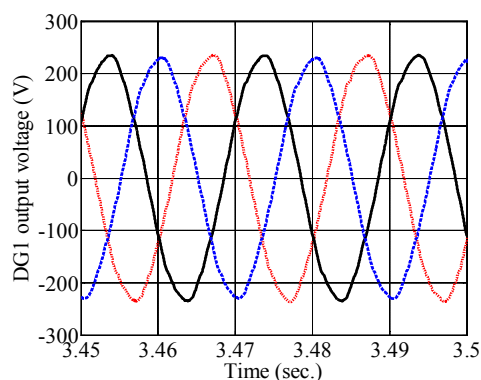
شکل (۳): دیاگرام‌های بد توابع انتقال حلقه بسته مراجع ولتاژ و امپدانس خروجی معادل سیستم کنترل (الف) $G_{CL}(s)$ (ب) G_{CL} (ج) $Z_0(s)$ (توالی مثبت (خط پر) و منفی (خط چین))



شکل (۴): ریزشبه‌ جزیره‌ای استفاده‌شده در شبیه‌سازی



(الف)



(ب)

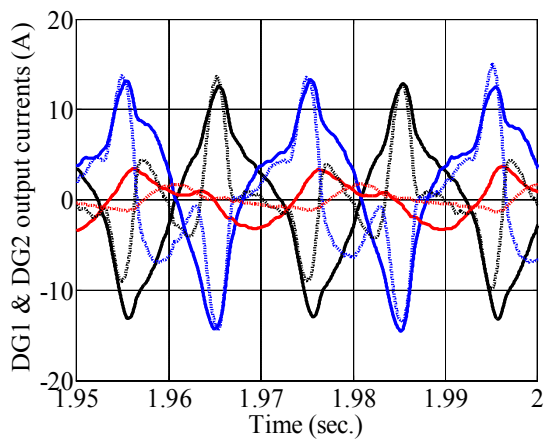
شکل (۵): شکل موج‌های ولتاژ خروجی DG_1 و DG_2 (الف) گام

اول (ب) گام دوم

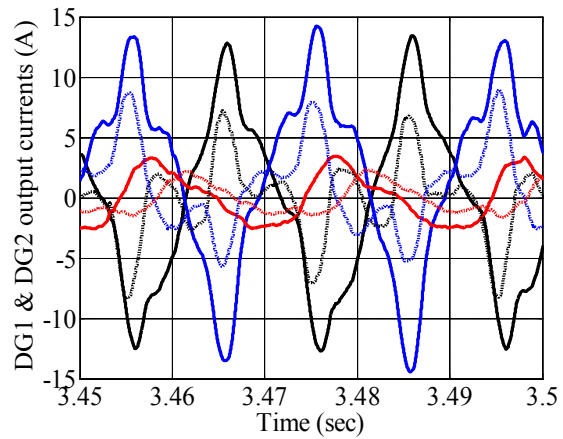
منفی مؤلفه اصلی و توالی منفی هارمونیک سوم نشان داده شده است. در شکل (۸) مشاهده می‌شود به‌رغم عدم تقارن امپدانس‌های خطوط توزیع DGها، توان‌های اکتیو و راکتیو توالی مثبت مؤلفه اصلی، به‌صورت متناسب برحسب توان نامی DGها بین آن‌ها تقسیم شده است. این موضوع کارایی کنترل‌کننده‌های افتی توان‌های اکتیو، راکتیو و امپدانس مجازی توالی مثبت مؤلفه اصلی را نشان می‌دهد. در شکل (۹) برای نمونه، توالی منفی هارمونیک ۳ام و توالی مثبت هارمونیک‌های ۵ام و ۷ام جریان چرخشی فاز "a" نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود در گام اول به‌دلیل عدم تقسیم مناسب مؤلفه‌های جریان بار، جریان چرخشی قابل توجهی میان DGها وجود دارد.

۲.۴. گام دوم

در گام دوم شبیه‌سازی، واحد جبران‌سازی خطای تقسیم مؤلفه‌های نامتعادل و هارمونیکی جریان بار، در کنترلر محلی DGها فعال می‌شوند. در شکل (۶) مشاهده می‌شود با اضافه شدن حلقه‌های تقسیم، تقسیم جریان بار بین DGها بهبود می‌یابد (افزایش مؤلفه‌های جریان DG_1 و کاهش مؤلفه‌های متناظر DG_2). این موضوع در شکل (۹)، در کاهش مؤلفه‌های هارمونیکی جریان چرخشی فاز "a"، نیز قابل مشاهده است. برای مشخص شدن بهتر موضوع، برای نمونه، جریان‌های توالی منفی مؤلفه اصلی و هارمونیک سوم به‌ترتیب در شکل‌های (۷-الف) و (۷-ب) نشان داده شده‌اند؛ مشاهده می‌شود که این جریان‌ها متناسب با توان نامی DGها بین آن‌ها تقسیم شده است. در شکل (۵) مشاهده می‌شود با اضافه شدن حلقه‌های تقسیم مؤلفه‌های جریان بار، ولتاژ خروجی DGها دچار اغتشاش خواهند شد؛ اما برخلاف روش‌های قبلی مانند طرح‌های امپدانس مجازی، اثر استراتژی کنترل پیشنهادی در افزایش اغتشاش خروجی DGها پایین‌تر خواهد بود. این واقعیت را می‌توان اینطور توجیه کرد که حلقه‌های جبران‌سازی پیشنهادی در مسیر فیدبک جریان‌های چرخشی توالی منفی مؤلفه اصلی و توالی منفی و مثبت مؤلفه‌های هارمونیکی جریان، به‌جای کل جریان بارهای خطی و غیرخطی همانند آنچه در طرح‌های امپدانس مجازی هستند، قرار گرفته‌اند.

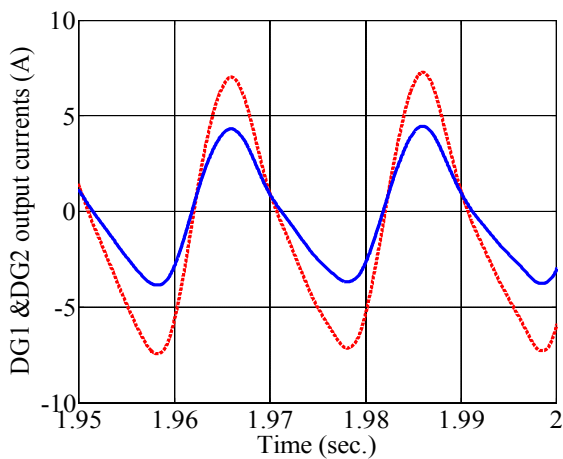


(الف)

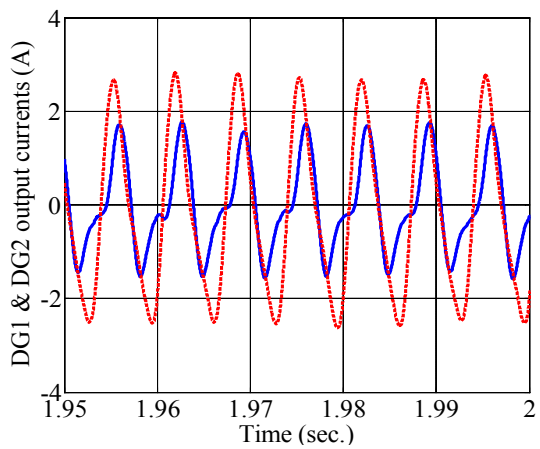
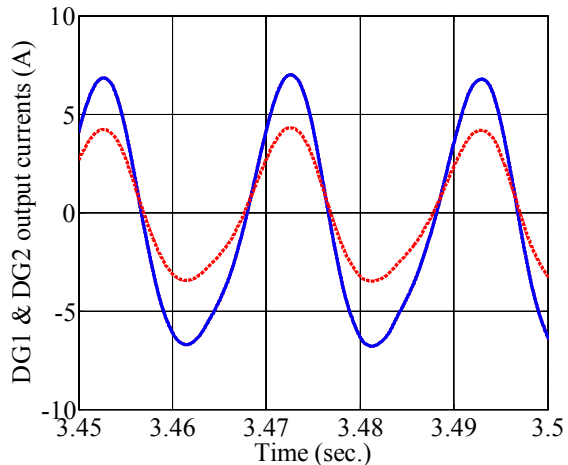


(ب)

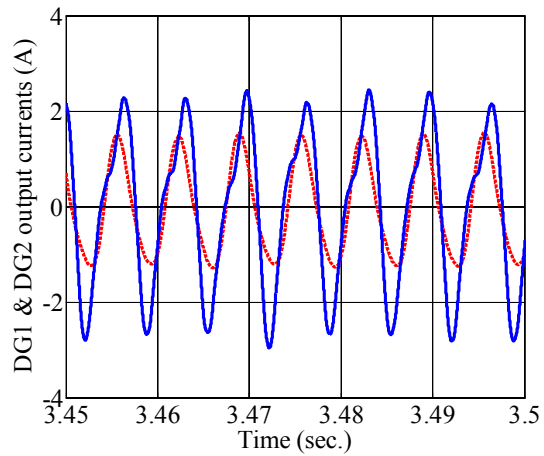
شکل (۶): شکل موج جریان‌های سه‌فاز خروجی DG_2 و DG_1 (الف) گام اول (ب) گام دوم (DG_1 : خط توپر، DG_2 : خط چین)



(الف)

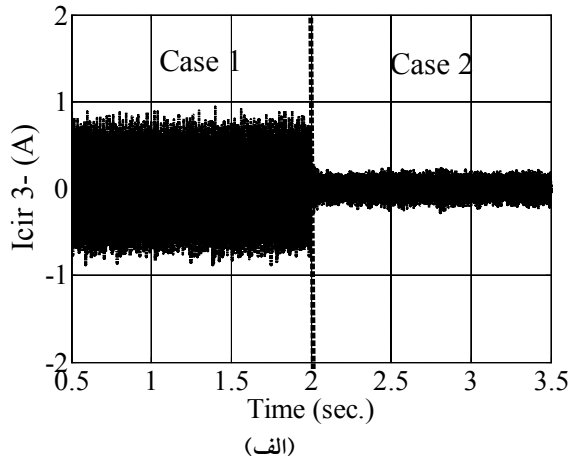


(ب)

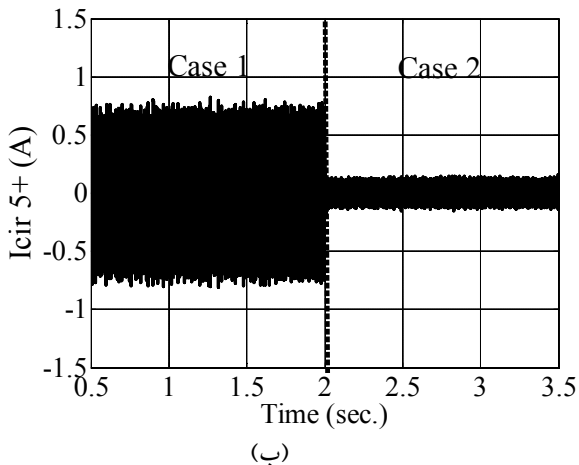


شکل (۷): شکل موج مؤلفه‌های جریان خروجی فاز "a" DG ها (الف) توالی منفی مؤلفه اصلی، (ب) توالی منفی هارمونیک ۳ام

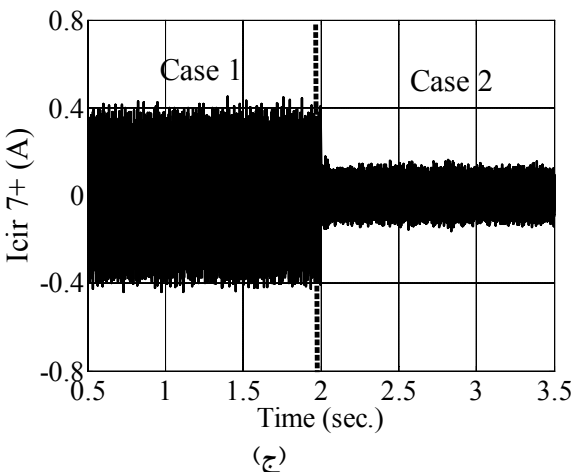
نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد ساختار پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان روش‌های کارآمد، مؤلفه‌های مختلف جریان بار را به‌صورت متناسب با توان نامی واحدها بین آن‌ها تقسیم کند.



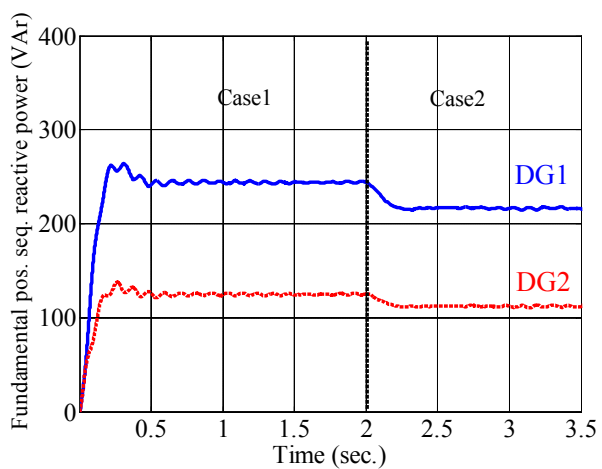
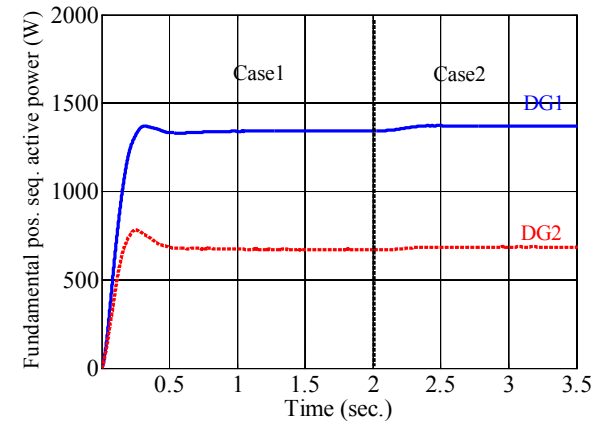
(الف)



(ب)



(ج)



شکل (۸): توان‌های خروجی توالی مثبت مؤلفه اصلی DG_1 و DG_2 .
(الف) توان اکتیو (ب) توان راکتیو

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای تقسیم دقیق مؤلفه‌های هارمونیک و نامتعادل جریان بار میان DG ها، یک روش بر اساس قاعده جریان‌های چرخشی پیشنهاد شد. این روش می‌تواند بر مبنای توان‌های هارمونیک و نامتعادل تأمین‌شده توسط هر DG ، به‌صورت تطبیقی، تقسیم بار بین DG ها را بهبود دهد. نشان داده شد که این روش پیشنهادی می‌تواند خطای تقسیم مؤلفه‌های جریان هارمونیک بار را بدون داشتن توپولوژی ریزشبکه مانند امپدانس‌های خطوط توزیع DG ها حذف کند. همچنین اثر کنترل پیشنهادی روی دامنه و کیفیت شکل موج ولتاژهای خروجی DG ها پایین خواهد بود. این مزیت به این دلیل است که حلقه‌های جبران‌سازی به‌جای قرار گرفتن در مسیر جریان‌های بارهای خطی و غیرخطی بزرگ، در مسیر جریان‌های چرخشی مؤلفه‌های هارمونیک و توالی منفی مؤلفه اصلی قرار گرفته‌اند.

شکل (۹): مؤلفه‌های هارمونیک جریان چرخشی مربوط به فاز "a"،
(الف) توالی منفی هارمونیک ۳ام (ب) توالی مثبت هارمونیک ۱۵ام
(ج) توالی مثبت هارمونیک ۱۷ام (خط توپر، DG_2 : خط چین)

مراجع

- [1] IEEE Standard 1547.4-2011, "IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems", 2011.
- [2] Wei, X., Xiangning, X. and Pengwei, C., "Overview of Key Microgrid Technologies", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 28, No. 7, pp. e2566, 2018.
- [3] براتی، حسن، امین‌زاده، هادی، «کنترل توان و فرکانس بار مبتنی بر روش کنترل شیب افقی بهبودیافته در سیستم‌های ترکیبی توربین بادی، فتوولتائیک و پیل سوختی در ریزشکبه‌های مستقل»، مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۶، شماره ۱، صفحه ۲۸-۳۹، ۱۳۹۵.
- [4] Ghanizadeh, R., Ebadian, M. and Gharehpetian, G. B., "Non-Linear Load Sharing and Voltage Harmonics Compensation in Islanded Microgrids With Converter Interfaced units", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 27, No. 1, pp. e2237, 2017.
- [5] شهرکی، محمد، فانی، بهادر، صادق‌خانی، ایمان، «کنترل افقی تطبیقی مبتنی بر امیدانس مجازی به منظور بهبود تسهیم توان راکتیو در ریزشکبه‌های اینورتری»، مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۹، شماره ۱، صفحه ۲۶-۳۵، ۱۳۹۸.
- [6] John, B., Ghosh, A. and Rajakaruna, S., "Improved Control Strategy for Accurate Load Power Sharing in an Autonomous Microgrid", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 11, No. 17, pp. 4384-4390, 2017.
- [7] Moussa, H., Shahin, A., Martin, J., Nahid-Mobarakeh, B., Pierfederici, S. and Moubayed, N., "Harmonic Power Sharing with Voltage Distortion Compensation of Droop Controlled Islanded Microgrids", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 5, pp. 5335-5347, 2018.
- [8] Moussa, H., Martin, J., Pierfederici, S., Meibody-Tabar, F. and Moubayed, N., "Voltage Harmonic Distortion Compensation with Non-Linear Load Power Sharing in Low-Voltage Islanded Microgrid", Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 158, pp. 32-48, 2018.
- [9] Zhou, J, Kim, S., Zhang, H., Sun, Q. and X Han, R., "Consensus-based Distributed Control for Accurate Reactive, Harmonic and Imbalance Power Sharing in Microgrids", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 4, pp. 2453-2467, 2018.
- [10] He, J., Wei Li, Y. and Blabjerg, F., "An Enhanced Islanding Microgrid Reactive Power, Imbalance Power, and Harmonic Power Sharing Scheme", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, No. 8, pp. 3389-3401, 2016.
- [11] Hoang, T. V. and Lee, H. H., "Accurate Power Sharing with Harmonic Power for Islanded Multibus Microgrids", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 7, No. 2, pp. 1286-1299, 2019.
- [12] Blanco, C., Tardelli, F., Reigosa, D., Zanchetta, P. and Briz, F., "Design of a Cooperative Voltage Harmonic Compensation Strategy for Islanded Microgrids Combining Virtual Admittance and Repetitive Controller", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 55, No. 1, pp. 680-688, 2019.
- [13] Blanco, C., Reigosa, D., Vasquez, J. C., Guerrero, J. M. and Briz, F., "Virtual Admittance Loop for Voltage Harmonic Compensation in Microgrids", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 52, No. 4, pp. 3348-3356, 2016.
- [14] Sabzevari, K., Karimi S., Khosravi F. and Vabdi, H., "Modified Droop Control for Improving Adaptive Virtual Impedance Strategy for Parallel Distributed Generation Units in Islanded Microgrids", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 29, No. 1, pp. e2689, 2019.
- [15] Sreekumar, P. and Khadkikar, V., "A New Virtual Harmonic Impedance cheme for Harmonic Power Sharing in an Islanded Microgrid", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 31, No. 3, pp. 936-945, 2016.
- [16] Liu, J., Miura, Y. and Ise, T., "Cost-Function-Based Microgrid Decentralized Control of Unbalance and Harmonics for Simultaneous Bus Voltage Compensation and Current Sharing", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 34, No. 8, pp. 7397-7410, 2019.
- [17] Baghaee, H. R., Mirsalim, M., Gharehpetian, G. B. and Talebi, H. A., "Unbalanced Harmonic Power Sharing and Voltage Compensation of Microgrids Using Radial Basis Function Neural Network-Based Harmonic Power-Flow Calculations for Distributed

- and Decentralized Control Structures", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 12, No. 7, pp. 1518-1530, 2018.
- [18] Kim, S., Hyon, S. and Kim, C., "Distributed Virtual Negative-Sequence Impedance Control for Accurate Imbalance Power Sharing in Islanded Microgrids", Sustainable Energy, Grids and Networks, Vol. 16, pp. 28-36, 2018.
- [19] Micallef, A. and Apap, M., Spiteri-Staines, C., Guerrero, J. M., "Mitigation of Harmonics in Grid-Connected and Islanded Microgrids Via Virtual Admittances and Impedances", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 8, No. 2, pp.651-661, 2017.
- [20] Gholami, S., Saha, A. and Aldeen, M., "Robust Multiobjective Control Method for Power Sharing Among Distributed Energy Resources in Islanded Microgrids with Unbalanced and Nonlinear Loads", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 94, pp. 321-338, 2018.
- [21] He, J., Pan, Y., Liang, B. and Wang, C., "A Simple Decentralized Islanding Microgrid Power Sharing Method without Using Droop Control", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 6, pp. 6128-6139, 2018.
- [22] Rezaei, M. M. and Soltani, J., "A Robust Control Strategy for a Grid-Connected Multi-Bus Microgrid Under Unbalanced Load Conditions", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 71, pp. 68-76, 2015.
- [23] Tuladhar, A., Jin, H., Unger, T. and Mauch, K., "Control of Parallel Inverters in Distributed AC Power Systems with Consideration of Line Impedance Effect", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 1, pp. 131-137, 2000.
- [24] He, J. and Li, Y. W., "An Enhanced Microgrid Load Demand Sharing Strategy", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No. 9, pp. 3984-3995, 2012.
- [25] Golsorkhi, M. S., Savaghebi, M., Dah-Chuan Lu, D., Guerrero, J. M. and Vasquez, J. C., "A GPS-Based Control Framework for Accurate Current Sharing and Power Quality Improvement in Microgrids", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 32, No. 7, pp. 5675-5687, 2016.
- [26] Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., Beaty, H. W., *Electrical Power Systems Quality*, (2nded), New York: McGraw-Hill, 2003.
- [27] Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., de Vicuna LG. and Castilla, M., "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids- a General Approach Toward Standardization", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 1, pp. 158-172, 2001.
- [28] Ghanizadeh, R. and Gharehpetian, B. G., "Voltage Quality and Load Sharing Improvement in Islanded Microgrids Using Distributed Hierarchical Control", IET Renewable Power Generation, Vol. 13, No. 15, pp. 2888-2898, 2019.
- [29] Savaghebi, M., Jalilian, A., Vasquez, J. C. and Guerrero, J. M., "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.
- [30] IEEE Standard 1459-2011, "IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, no Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions", 2010.
- [31] Rodriguez, P., Timbus, A. V., Teodorescu, R., Liserre, M. and Blaabjerg, F., "Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 5, pp. 2583-2592, 2007.
- [32] Ghanizadeh, R., Ebadian, M. and Gharehpetian, G.B., "Control of Inverter-Interfaced Distributed Generation Units for Voltage and Current Harmonics Compensation in Grid-Connected Microgrids", Journal of Operation and Automation in Power Engineering, Vol. 4, No. 1, pp.66-82, 2016.
- [33] Ghanizadeh, R. and Gharehpetian, B. G., "Distributed Hierarchical Control Structure for Voltage Harmonic Compensation and Harmonic Current Sharing in Isolated Microgrids", Sustainable Energy, Grids and Networks, Vol. 16, pp. 55-69, 2018.
- [34] Lorzadeh, I., Askarian Abyaneh, H., Savaghebi, M., Lorzadeh, O., Bakhshai, A. and Guerrero, J. M., "An Enhanced Instantaneous Circulating Current Control for Reactive Power and Harmonic Load Sharing in Islanded Microgrids", Journal of Power Electronics, Vol. 17, No. 6, pp. 1658-1671, 2017.
- [35] He, J. Y. and Li, Y. W., "Generalized Closed-Loop Control Schemes with Embedded Virtual Impedances for Voltage Source Converters with LC or LCL Filters", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No. 4, pp. 1850-1861, 2012.
- [36] Savaghebi, M., Vesquez, J. C., Jalilian, A., Guerrero J. M. and Lee T. L., "Selective Compensation of Voltage

Harmonics in Grid-Connected Microgrids,
International Journal of Mathematics and Computers
in Simulation, Vol. 91, pp. 211-228, 2013.