

بهینه‌سازی چند هدفه مبدل واسط سیستم‌های فتوولتائیک به منظور بهبود کیفیت توان در ریزشبه‌های مستقل

علی رضائی^۱، مجیدرضا ناصح^۲، مرتضی حق‌شناس^۳

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات خراسان، شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان جنوبی.
- ۲- عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیرجند.
- ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه بیرجند.

چکیده

ریزشبکه یک شبکه محلی شامل واحدهای تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و بارهای کنترل‌پذیر است که می‌تواند در دو حالت متصل به شبکه سراسری یا مستقل از آن (جزیره‌ای) مورد بهره‌برداری قرار بگیرد. سیستم‌های فتوولتائیک یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی هستند که به دلیل مزایای زیادشان اخیراً کاربرد گسترده‌ای به عنوان منابع تولید پراکنده در ریزشبه‌ها پیدا کرده‌اند. از آنجا که توان تولیدی این منابع از نوع DC است، ولتاژ تولیدی آرایه‌های خورشیدی توسط یک مبدل DC/DC به مقدار مطلوب افزایش داده شده و سپس توان تولیدی این سیستم‌ها توسط یک مبدل واسط به ریزشبه تزریق می‌شود. حضور بارهای نامتعادل و غیرخطی از مهمترین عواملی هستند که می‌توانند کیفیت توان ریزشبه‌ها را به ویژه در شرایط عملکرد جزیره‌ای تحت تاثیر قرار دهند. هدف این مقاله بهینه‌سازی چند هدفه پارامترهای کنترل کننده به منظور کاهش همزمان اغتشاشات هارمونیک ولتاژ و میزان انحراف ولتاژهای سه‌فاز از مقادیر مرجع در حالت عملکرد جزیره‌ای ریزشبه می‌باشد. در این راستا از روش بهینه‌سازی تجمع ذرات با ضرایب شتاب متغیر به منظور بهینه‌سازی همزمان اهداف مسئله استفاده شده است. در این روش با تغییر ضرایب شتاب ذرات از همگرایی الگوریتم کلاسیک PSO به نقاط بهینه محلی جلوگیری شده و باعث همگرایی الگوریتم به سمت نقطه بهینه واقعی می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB برای سه سناریوی متفاوت صحت عملکرد روش پیشنهادی را در جبران اغتشاشات بار تأیید می‌کند.

کلمات کلیدی: سیستم‌های فتوولتائیک، مبدل واسط الکترونیک قدرت، کیفیت توان، بهینه‌سازی چند هدفه، ریزشبه مستقل

۱- مقدمه

در پی گسترش استفاده از تولیدات پراکنده در سیستم قدرت، استفاده از ریزشبه‌ها مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. ریزشبه یک شبکه محلی شامل واحدهای تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و بارهای کنترل پذیر است که می‌تواند در دو حالت متصل به شبکه اصلی یا مستقل از آن (جزیره‌ای) مورد بهره‌برداری قرار بگیرد [۱]. استفاده بهینه از ریزشبه‌ها باعث عدم نیاز به احداث شبکه‌های انتقال جدید، کاهش آلودگی محیط زیست، کاهش تلفات انرژی در شبکه، افزایش کیفیت توان و نیز ایجاد راهکارهای مناسب جهت استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی می‌شود. سیستم‌های فتوولتائیک یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی هستند که به دلیل مزایای زیادشان اخیراً کاربرد گسترده‌ای به عنوان منابع تولید پراکنده در ریزشبه‌ها پیدا کرده‌اند. از آنجا که توان تولیدی این منابع از نوع DC است، ولتاژ تولیدی آرایه‌های خورشیدی توسط یک مبدل DC/DC به مقدار مطلوب افزایش داده شده و سپس توان تولیدی این سیستم‌ها توسط یک مبدل واسط به ریزشبه تزریق می‌شود. پیشرفت‌هایی که تا کنون در زمینه الکترونیک قدرت ایجاد شده بستر مناسبی را برای بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های فتوولتائیک فراهم کرده است [۲]. از آنجا که گسترش بارهای غیرخطی و نامتعادل در شبکه می‌تواند باعث آلودگی هارمونیک و نامتعادلی شبکه‌های کوچک شود، یکی از مهمترین چالش‌ها در میکروشبکه موضوع کیفیت توان می‌باشد [۳]. عدم تعادل و فلش ولتاژ در شبکه‌های توزیع مهمترین مشکلاتی هستند که کیفیت توان میکروشبکه‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند [۴ و ۵]. تاکنون روش‌های متفاوتی برای بهبود کیفیت توان میکروشبکه‌ها در حالات کاری مختلف ارائه شده است. در این راستا مرجع [۶] الگوریتم بازگشتی و [۷] الگوریتم بازگشتی بر پایه H^∞ را پیشنهاد داده‌اند. یک روش بهینه کنترل توان در [۸] پیشنهاد شده است و مولفین [۹ و ۱۰] اغتشاشات ایجاد شده در اثر تغییرات توان را با کنترل مشخصه‌های اکتیو و ولتاژ/فرکانس کنترل کرده‌اند. همچنین در تعدادی از مقالات به منظور جبران اغتشاشات کیفیت توان در ریزشبه‌ها از جبران سازهای استاتیکی استفاده کرده‌اند. در این زمینه یک روش ترکیبی برای جبران‌سازی سیستم‌هایی که دارای بار نامتعادل و غیرخطی هستند در [۱۱] پیشنهاد شده است. مرجع [۱۲] ترکیب کنترل چندسطحی در STATCOM را برای جبران نامتعادلی بار پیشنهاد کرده و اتصالات مختلف را از نظر اقتصادی مورد بررسی و مقایسه قرار داده است. در [۱۳] از یک بار متعادل‌ساز و یک جبران‌کننده STATCOM برای جبران نامتعادلی توان‌های اکتیو و راکتیو مبتنی بر کنترل فازی استفاده شده است. روش‌های دیگری نیز پیشنهاد شده که در آنها از انواع مختلف جبران‌سازهای استاتیکی استفاده شده است [۱۴ و ۱۵].

در این مقاله با ارائه یک استراتژی کنترلی بهینه مبتنی بر بهینه‌سازی چند هدفه برای مبدل واسط سیستم فتوولتائیک، از این سیستم علاوه بر مشارکت در تأمین تقاضای بار به عنوان یک جبران‌کننده موازی برای جبران اغتشاشات ایجاد شده توسط بارهای نامتعادل و غیر خطی استفاده شده و عملکرد طرح پیشنهادی در چند سناریو متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

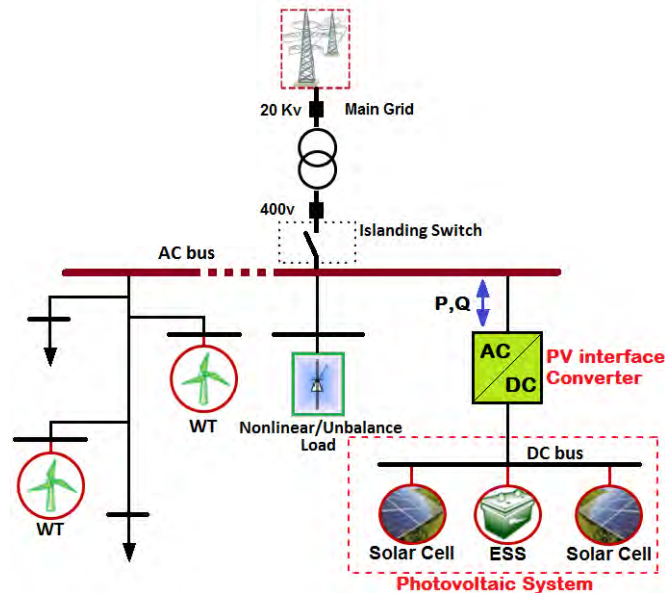
۲- ساختار کلی ریزشبه در حالت عملکرد جزیره‌ای

سیستم مورد مطالعه در این مقاله ریزشبه‌ای با منابع تولید پراکنده از نوع فتوولتائیک و توربین بادی می‌باشد. ساختار کلی این ریزشبه در شکل ۱ ارائه شده است. در اینجا به منظور افزایش ولتاژ خروجی آرایه خورشیدی از یک مبدل بوست استفاده شده است. جزئیات کامل در رابطه با عملکرد و نحوه کنترل این مبدل در [۱۶] ارائه شده است. در این ساختار منظور از سیستم فتوولتائیک مجموعه‌ای آرایه‌های خورشیدی، مبدل DC/DC و سیستم ذخیره‌ساز انرژی می‌باشد.

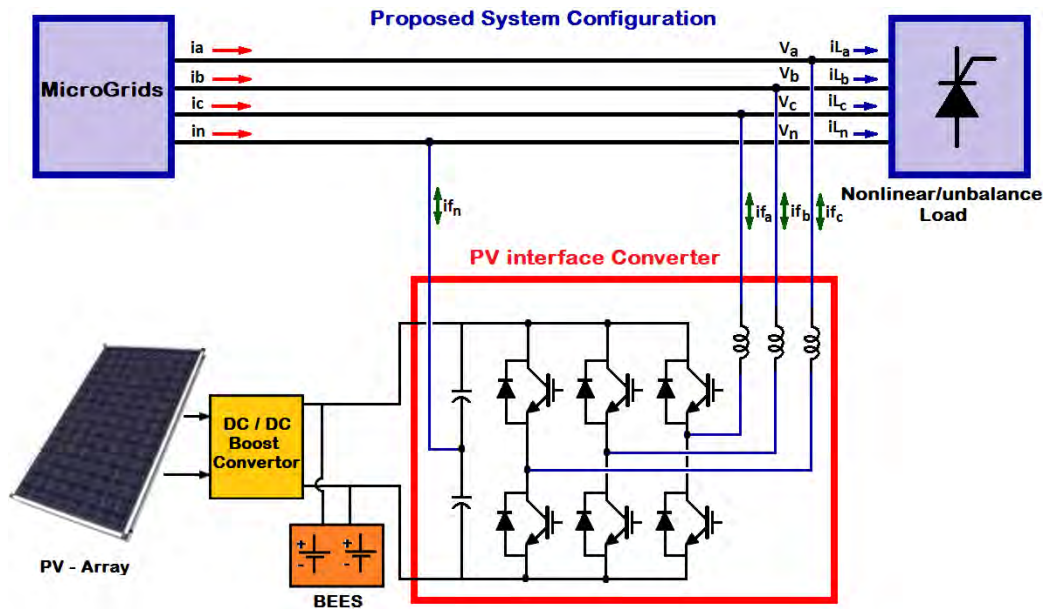
۳- اصول عملکرد مبدل واسط سیستم فتوولتائیک در ریزشبه

در ساده‌ترین حالت مبدل واسط سیستم فتوولتائیک یک مبدل منبع ولتاژ است که می‌تواند ولتاژ خروجی سیستم فتوولتائیک را به یک مجموعه سه‌فاز AC با دامنه و فاز قابل کنترل تبدیل کند. این مبدل قادر است علاوه بر تزریق توان اکتیو تولید شده توسط سیستم فتوولتائیک به ریزشبه، با کنترل توان راکتیو ولتاژ ریزشبه را تثبیت و کیفیت توان را در آن بهبود بخشد. در [۱۷] نشان داده شده است که توپولوژی مبدل‌های سه فاز چهارسیمه قابلیت کنترل گسترده‌تری نسبت به مبدل‌های سه فاز سه سیمه دارند. با این حال در اکثر کاربردها به ویژه در سیستم‌های فتوولتائیک به دلیل مسائل فنی و اقتصادی استفاده از مبدل‌های سه‌فاز سه سیمه رایج‌تر است. در این مقاله نشان داده می‌شود که با اتخاذ استراتژی مناسب برای کنترل مبدل واسط سیستم فتوولتائیک می‌توان کلیه اغتشاشات ایجاد شده در ولتاژ و جریان ریزشبه را جبران کرد. ساختار کلی مبدل واسط سیستم فتوولتائیک و نحوه ارتباط آن با ریزشبه در شکل ۲ ارائه شده است.

شکل ۱. ساختار کلی ریزشبه مورد مطالعه در حالت عملکرد جزیره‌ای



شکل ۲. ساختار کلی مبدل واسط سیستم فتوولتائیک



$$i_{fa} + i_{fb} + i_{fc} = i_{fn} \quad (1)$$

در رابطه فوق i_{fa} ، i_{fb} و i_{fc} جریان‌های فاز مبدل و i_{fn} جریان نوترال می‌باشد. در توپولوژی ارائه شده در شکل ۲ می‌توان جریان دریافتی از باس ریزشکه را بصورت زیر بیان کرد.

$$i_x = i_{fx} + i_{lx} \quad x \in (a, b, c) \quad (2)$$

که در آن i_{fx} جریان مبدل و i_{lx} جریان بار ریزشکه می‌باشد. در این حالت جریان لحظه‌ای بار در رابطه ۳ و جریان مبدل سیستم فتوولتائیک که به عنوان یک مطلوب کننده توان فعال در ریزشکه عمل می‌کند در رابطه ۴ ارائه شده است.

$$i_{lx} = i_{lx}^1 + i_{lx_k} + i_{lx_q} \quad (3)$$

$$i_{fx} = i_{fx}^1 + \tilde{i}_{fx} \quad (4)$$

که در آن i_{lx}^1 مولفه اصلی جریان اکتیو بار، i_{lx_k} مجموع مولفه‌های هارمونیک جریان بار، i_{lx_q} مولفه راکتیو جریان بار، i_{fx}^1 مولفه اصلی جریان مطلوب کننده توان و \tilde{i}_{fx} مولفه اغتشاشی جریان می‌باشد. با توجه به روابط فوق جریان کشیده شده از باس AC ریزشکه یک جریان کاملا سینوسی و متعادل است که تعادل ولتاژهای سه‌فاز را به همراه دارد. بنابراین به منظور حصول اطمینان از کیفیت مطلوب ولتاژ و جریان ریزشکه در شرایط نامتعادل و غیرخطی، در طراحی استراتژی کنترل مبدل واسط سیستم فتوولتائیک باید رابطه زیر در نظر گرفته شود.

$$i_{lx}^1 + i_{lx_k} + i_{lx_q} + i_{fx}^1 + \tilde{i}_{fx} = i_x \quad (5)$$

علاوه بر اغتشاش هارمونیک ایجاد شده توسط بارهای غیرخطی در ریزشکه، روش کنترل سوئیچینگ مبدل واسط سیستم فتوولتائیک نیز می‌تواند باعث ایجاد مولفه‌های فرکانس بالا در جریان تزریقی سیستم فتوولتائیک به ریزشکه شود.

این مولفه‌های فرکانس بالا معمولاً بصورت ضرابی از فرکانس سوئیچینگ مبدل ظاهر می‌شوند و در صورتی که ریزشبهه دارای بارهای حساس باشد توجه به این قضیه اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در این مقاله از یک روش جدید کنترل سوئیچینگ مبدل استفاده شده است که در آن علاوه بر افزایش سرعت پاسخ، میزان هارمونیک تولید شده در اثر کلیدزنی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

۴- استراتژی کنترل پیشنهادی برای بهبود کیفیت توان ریزشبهه در عملکرد جزیره‌ای

تا کنون روش‌های متفاوتی برای طراحی مبدل‌های الکترونیک قدرت به منظور بهبود عملکرد آنها در شرایط اغتشاش پیشنهاد شده است. در [۱۹ و ۱۸] استراتژی‌های متفاوتی برای کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت به منظور کاربرد در شبکه‌های توزیع نیروی برق پیشنهاد شده است. در این مراجع فرض شده است که ولتاژهای سه‌فاز شبکه توزیع همواره سینوسی و متعادل است. این در حالی است که ریزشبهه‌ها، به ویژه در حالت عملکرد جزیره‌ای، اغتشاشات بار می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ولتاژهای سه‌فاز داشته باشد و آنها را از حالت تعادل خارج کند.

روش کنترل پیشنهادی برای مبدل سیستم فتوولتائیک در این مقاله معادل با یک روش جبران‌سازی است که در آن از انرژی واحد فتوولتائیک در ریزشبهه برای جبران اغتشاشات ایجاد شده توسط بار استفاده می‌شود. در این طرح پس از نمونه برداری از ولتاژهای سه‌فاز باس AC ریزشبهه و جریان بار از یک حلقه قفل شونده در فاز^۱ برای تعیین فرکانس مولفه اصلی جریان استفاده شده است. همچنین به منظور تعیین مقدار دامنه مولفه اصلی جریان ولتاژ لینک DC مبدل واسط سیستم فتوولتائیک با یک مقدار مرجع مقایسه شده و خطای حاصل از این مقایسه به یک کنترل کننده PI اعمال شده است. به منظور بهبود سرعت و دقت عملکرد طرح کنترل پیشنهادی در شرایط نامتعادل و غیرخطی، ضرایب بهینه کنترلر PI با در نظر گرفتن شاخص‌های کیفیت توان توسط روش بهبود یافته PSO و منطق فازی تعیین می‌گردد. با توجه به دامنه و زاویه فاز محاسبه شده برای جریان‌ها، می‌توان جریان‌های مرجع مورد نیاز برای کنترل کلیدهای مبدل (i_a^*, i_b^*, i_c^*) را بصورت روابط ۶ تا ۸ بیان کرد. ساختار کنترلی پیشنهادی برای مبدل و نحوه اتصال آن با ریزشبهه در شکل ۳ ارائه شده است.

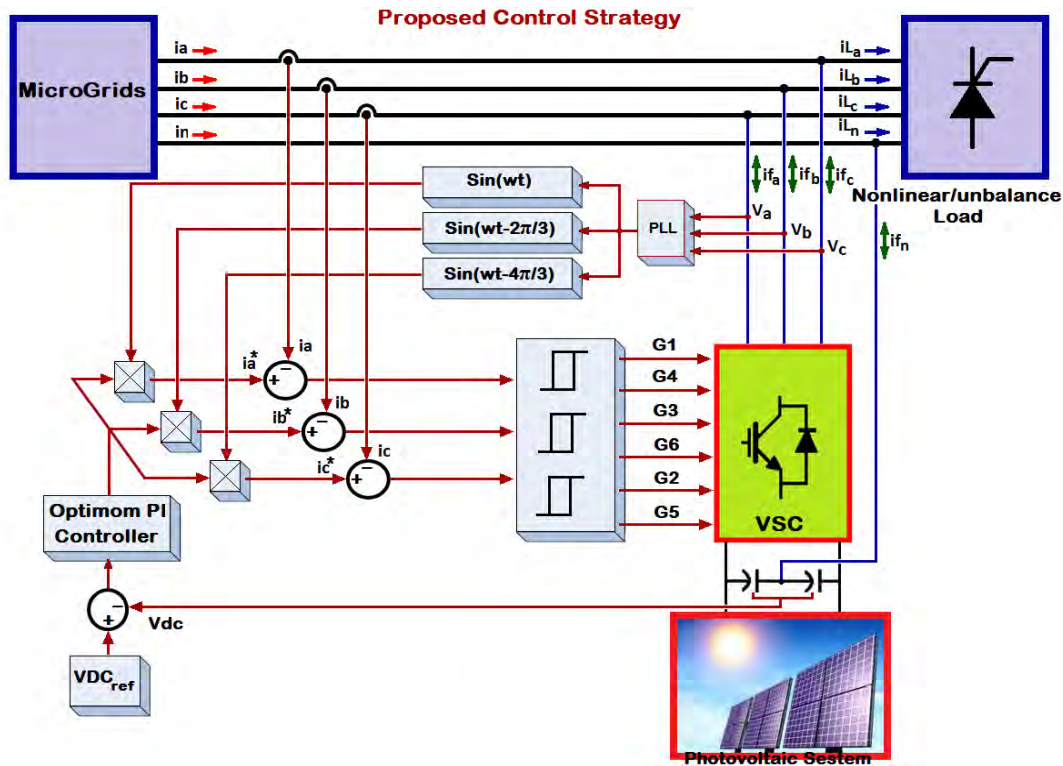
$$i_a^* = (PI) \cdot \sin(\omega t) \quad (۶)$$

$$i_b^* = (PI) \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (۷)$$

$$i_c^* = (PI) \cdot \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (۸)$$

^۱. Phase Locked Loop - PLL

شکل ۳. ساختار کلی طرح کنترل مبدل واسط سیستم فتوولتائیک به منظور جبران اغتشاشات بار ریزشکه در عملکرد جزیره‌ای



۱-۴- روش پیشنهادی برای کنترل جریان هیستریزس

کنترل جریان هیستریزس در هر فاز بصورت جداگانه انجام می‌گیرد و سیگنال‌های آتش مورد نیاز اینورتر را برای بازوی متناظر با همان فاز تولید می‌کند. در اکثر موارد برای کنترل جریان از روش باند هیستریزس ثابت^۱ (FHB) استفاده می‌شود. یکی از مشکلات این روش فرکانس سوئیچینگ متغیر آن می‌باشد که باعث افزایش تلفات کلیدزنی و تزریق مولفه‌های جریانی فرکانس بالا در جریان منبع می‌شود. برای رفع این مشکل، روش هیستریزس باند متغیر^۲ (AHB) استفاده می‌شود که با محاسبه لحظه‌ای پهنای باند هیستریزس فرکانس سوئیچینگ را ثابت نگه می‌دارد [۱۳ و ۲۰]. مهمترین عیب روش باند متغیر این است که به علت محاسبات متعدد از سرعت و زمان پاسخ آن کاسته می‌شود. از مقایسه دو روش فوق این نتیجه حاصل می‌شود که در روش باند متغیر یک تناسب بین فرکانس سوئیچینگ و THD^۳ برقرار شده و این تنها حاصل تغییر مقدار عرض باند می‌باشد. با این روش هم فرکانس در حد مطلوبی ثابت می‌ماند و هم THD دارای مقدار قابل قبولی است. حال چنانچه عرض باند در روش FHB را هنگام طراحی سیستم از روی پارامترهای سیستم و به کمک رابطه ۹ بدست آوریم می‌توان به نتایج مشابهی با روش AHB دست یافت. به این صورت که فرکانس سوئیچینگ مشابه روش AHB ثابت می‌شود و از سوی

¹ Fixed Hysteresis Band - FHB

² Adoptive Hysteresis Band - AHB

³ Total Harmonic Distortion - THD

دیگر THD جریان مبدل نیز در دو روش مقدار نزدیک به هم خواهند داشت. لذا می توان برای هر سیستم با توجه به پارامترهای مورد نظر در طراحی، پهنای باند را توسط رابطه ۹ بصورت منحصر به فرد بدست آورد.

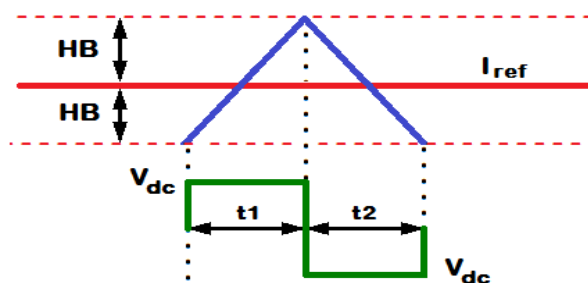
$$HB = \frac{V_{dc}}{4f.L_f} - \frac{L_f}{4f.V_{dc}} \left(\frac{V_S(t)}{L_f} + \frac{d i_{ref}(t)}{dt} \right)^2 \quad (9)$$

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} \quad (10)$$

که در آن f فرکانس سوئیچینگ و t_1 , t_2 زمان های روشن و خاموش بودن سوئیچ ها می باشد. با توجه به شکل ۴ در صورتیکه خطای حاصل از مقایسه جریان واقعی و جریان مرجع در هر فاز از محدوده بالای باند هیستریزس تجاوز کند، کلید بالایی در بازوی متناظر با آن فاز در اینورتر خاموش و کلید پایینی روشن می شود. عکس این حالت نیز برای وقتی که سیگنال خطا از حد پایین باند هیستریزس تجاوز کند صادق است. نحوه این عملکرد در زیر نشان داده شده است.

$$S = \begin{cases} 0 & \text{if } I_{act}(t) > I_{ref}(t) + HB \\ 1 & \text{if } I_{act}(t) < I_{ref}(t) - HB \end{cases} \quad (11)$$

شکل ۴. منحنی باند هیستریزی



۲-۴- الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات با ضرایب شتاب متغیر با زمان

الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات PSO^1 یک تکنیک بهینه سازی مبتنی بر جمعیت می باشد که اولین بار توسط کندی و ابرهات مطرح شد. ایده اصلی الگوریتم PSO مدل سازی و شبیه سازی رفتار گروهی پرندگان در جستجوی غذا می باشد. در این الگوریتم هریک از ذرات در فضای چند بعدی به عنوان یک کاندید برای جواب نهایی مسئله می باشد. روابط و جزئیات کامل این روش بهینه سازی بطور کامل در [۲۱] ارائه شده است. اگر چه الگوریتم PSO کلاسیک می تواند به جواب های نزدیک به بهینه همگرا شود ولی به دلیل عدم وجود تنوع در فضای جستجو توانایی این الگوریتم در تنظیم جواب های بهینه ضعیف است. در این مقاله از الگوریتم بهبود یافته تجمع ذرات که در آن ضرایب شتاب بصورت متغیر با زمان می باشد استفاده شده است. در این روش مجموعه ای از جواب های ممکن در نقاط مختلف فضای جستجو پخش شده و با متغیر کردن ضرایب شتاب فضای جستجو به منظور جلوگیری از قرار گرفتن الگوریتم در نقاط بهینه محلی و دسترسی سریعتر به پاسخ بهینه مطلق گسترش داده می شود. در این حالت ضرایب شتاب به صورت زیر محاسبه می شوند.

¹ Particle Swarm Optimization- PSO

$$C_1 = (C_{1f} - C_{1i}) \cdot \frac{\text{iteration}}{\text{max iteration}} + C_{1i} \quad (12)$$

$$C_2 = (C_{2f} - C_{2i}) \cdot \frac{\text{iteration}}{\text{max iteration}} + C_{2i} \quad (13)$$

که در آن C_{2f} ، C_{1f} ، C_{2i} ، C_{1i} مقادیر اولیه و نهایی ضرایب شتاب هستند.

۳-۴- تعیین ضرایب بهینه کنترلر مبتنی بر بهینه‌سازی چند هدفه با توابع عضویت فازی

یکی از این روش‌های پر کاربرد در حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه با اهداف غیر هم‌جنس، تعریف هر یک از اهداف مسئله در قالب یک تابع عضویت فازی و ترکیب اهداف مسئله با استفاده از ضرایب وزنی مناسب می‌باشد. در این حالت مجموع اهداف مسئله به صورت یک تابع مطلوبیت فازی قابل بیان است [۲۲]. در این مقاله هدف تعیین ضرایب بهینه کنترلر PI به منظور دسترسی به یک ولتاژ متعادل با دامنه ثابت و حداقل مقدار THD در ریزشبه می‌باشد. در این راستا تابع هدف استفاده شده بصورت رابطه زیر می‌باشد.

$$\text{minimize } f = \omega_1 \cdot \mu T + \omega_2 \mu D \quad (14)$$

که در آن μT میزان تابع عضویت اغتشاش هارمونیک ولتاژ ریزشبه، μD میزان تابع عضویت انحراف ولتاژ از مقدار مرجع و ω_1 و ω_2 ضرایب وزنی اختصاص داده شده به هر یک از اهداف مسئله می‌باشند. دلیل اصلی بکارگیری این روش برای بهینه‌سازی همزمان اغتشاش هارمونیک و انحراف ولتاژ ریزشبه تناسبی است که بین روند رشد اهداف وجود دارد. در این روش می‌توان ضرایب وزنی اهداف را با توجه به اهمیت آنها به گونه‌ای انتخاب کرد که مجموع آنها برابر یک باشد. همچنین تابع عضویت فازی در نظر گرفته شده برای هر هدف نحوه تغییرات مطلوبیت آن هدف را در بازه [۰ و ۱] بیان می‌کند.

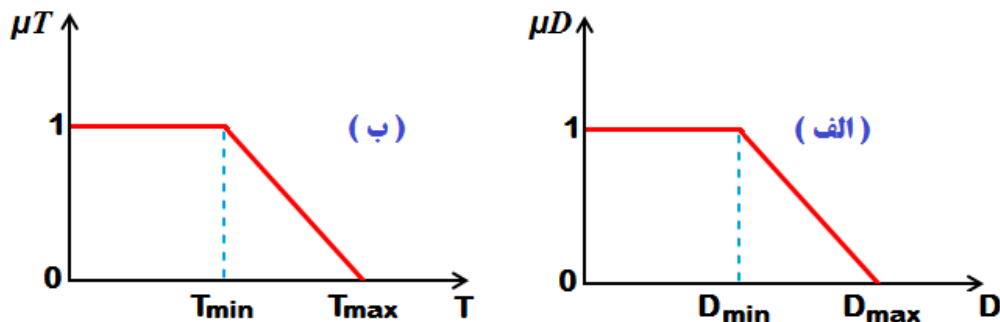
در بهینه‌سازی میزان انحراف ولتاژ سعی بر آن است که انحراف مقدار واقعی ولتاژ ریزشبه V_l از مقدار مرجع V_b به کمترین مقدار ممکن برسد. این انحراف ولتاژ را می‌توان توسط رابطه ۱۵ محاسبه نمود. چنانچه مقدار ماکزیمم انحراف ولتاژ در ریزشبه کاهش یابد مقدار مطلوبیت بیشتری به ولتاژ اختصاص داده می‌شود و چنانچه انحراف ولتاژ از مقدار مرجع بیشتر شود، مقدار مطلوبیت کمتر خواهد بود. توابع عضویت انحراف ولتاژ و اعوجاج هارمونیک کل در روابط ۱۶ و ۱۷ ارائه شده است.

$$D = \max |V_b - V_l| \quad (15)$$

$$\mu D = \begin{cases} 1 & \text{for } D < D_{\min} \\ \frac{D_{\max} - D}{D_{\max} - D_{\min}} & \text{for } D_{\min} < D < D_{\max} \\ 0 & \text{for } D > D_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

$$\mu T = \begin{cases} 1 & \text{for } T < T_{\min} \\ \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\min}} & \text{for } T_{\min} < T < T_{\max} \\ 0 & \text{for } T > T_{\max} \end{cases} \quad (17)$$

شکل ۵. الف) تابع عضویت فازی انحراف ولتاژ . ب) تابع عضویت فازی THD



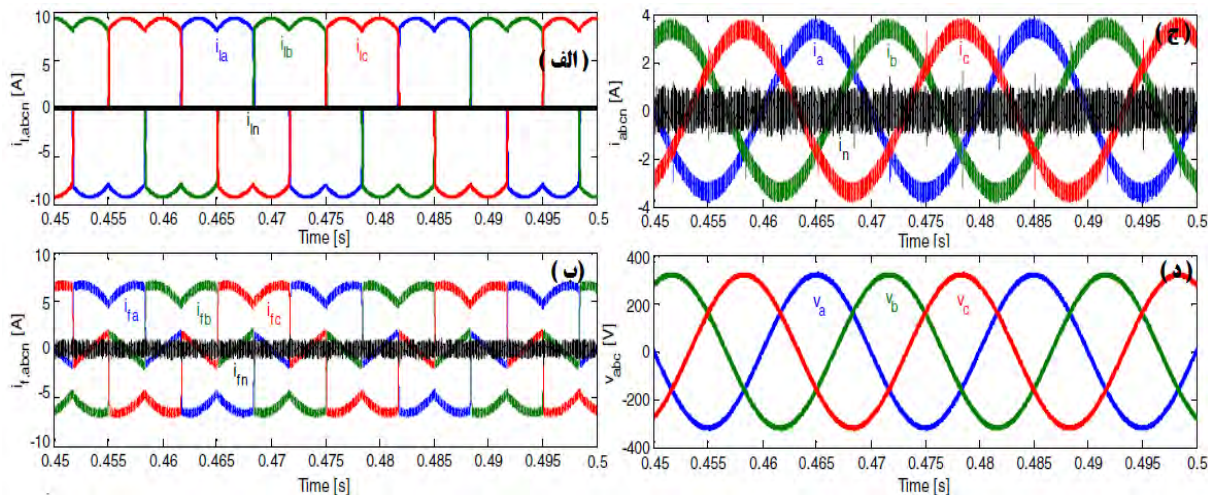
۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی طرح پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB برای سه سناریوی متفاوت ارائه و مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این شبیه‌سازی مطابق با استاندارد IEEE-519 حد قابل قبول برای ولتاژ ریزش شبکه مقداری بین ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت و میزان مجاز تولید اعوجاج هارمونیک کل برابر با ۵ درصد در نظر گرفته شده است. از اینرو حداقل و حداکثر انحراف ولتاژ از مقدار مرجع $D_{min} = 0$ و $D_{max} = 0.05$ و حداقل و حداکثر مقدار مجاز تولید اعوجاج هارمونیک کل $T_{min} = 0$ و $T_{max} = 0.05$ می‌باشد. در این راستا ضرایب کنترل کننده PI با هدف کمینه‌سازی تابع هدف تعریف شده در رابطه ۱۴ تعیین شده و نتایج عملکرد طرح پیشنهادی در ۳ سناریو ارائه شده است. همچنین با توجه به اینکه هدف بررسی عملکرد سیستم فتوولتائیک در جبران اغتشاشات بار است، توان تولیدی ژنراتورهای بادی در حالت ماندگار مقداری ثابت برابر با ۱۰ کیلو وات در نظر گرفته شده است.

۵-۱- عملکرد مبدل واسط سیستم فتوولتائیک در حضور بارهای غیر خطی

جهت مشاهده عملکرد طرح کنترل پیشنهادی در حضور بارهای غیر خطی، در این بخش از یک یکسوساز سه‌فاز کنترل نشده با بار مقاومتی به همراه یک فیلتر LC با مشخصات $(R=20\Omega, L=15\mu H, C=100\mu F)$ بعنوان بار غیر خطی ریزش شبکه استفاده کرده‌ایم. در این حالت میزان تقاضای بار ۶ کیلو وات و حداکثر ظرفیت تولید سیستم فتوولتائیک ۴/۵ کیلو وات در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی این حالت شامل جریان بار غیر خطی، جریان تولیدی مبدل سیستم فتوولتائیک، جریان دریافتی بار از باس ریزش شبکه و ولتاژ باس AC ریزش شبکه در شکل ۶ ارائه شده است.

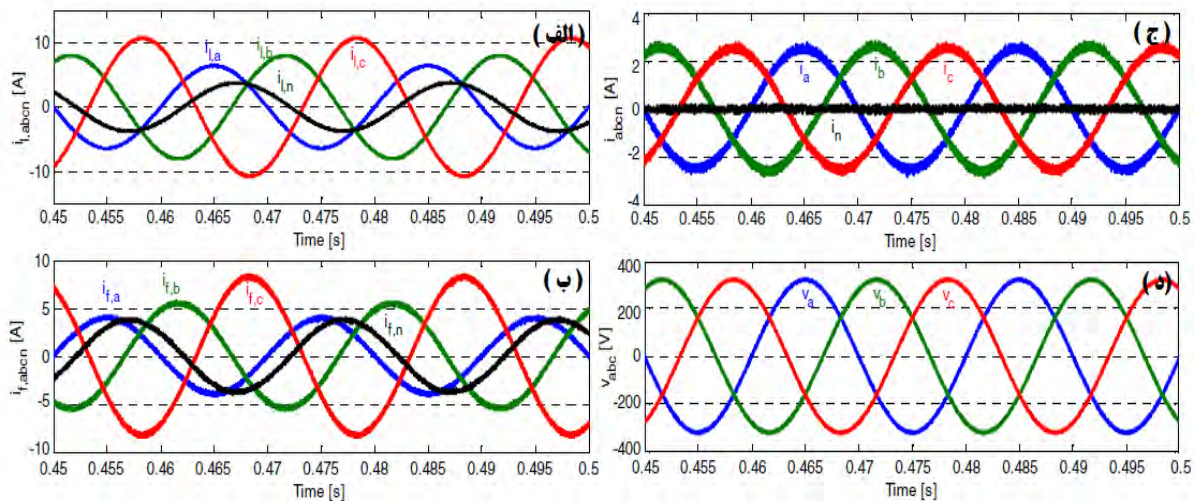
شکل ۶. نتایج شبیه سازی بار غیرخطی. الف) جریان بار غیر خطی. ب) جریان تزریق شده توسط مبدل سیستم فتوولتائیک. ج) جریان دریافتی بار از باس ریزشبه. د) ولتاژ باس AC ریزشبه.



۲-۵- عملکرد مبدل واسط سیستم فتوولتائیک در حضور بارهای نامتعادل

به منظور مشاهده عملکرد طرح کنترل پیشنهادی در شرایط نامتعادل، سه بار اهمی تک فاز با توان‌های نابرابر به ریزشبه اعمال شده است. در این حالت بار متصل شده به فاز a برابر 1kw، بار متصل به فاز b برابر 1.3kw و بار متصل به فاز c معادل 3kw در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی این حالت شامل جریان بار غیرخطی، جریان تولیدی مبدل سیستم فتوولتائیک، جریان دریافتی بار از باس ریزشبه و ولتاژ باس ریزشبه در شکل ۷ ارائه شده است.

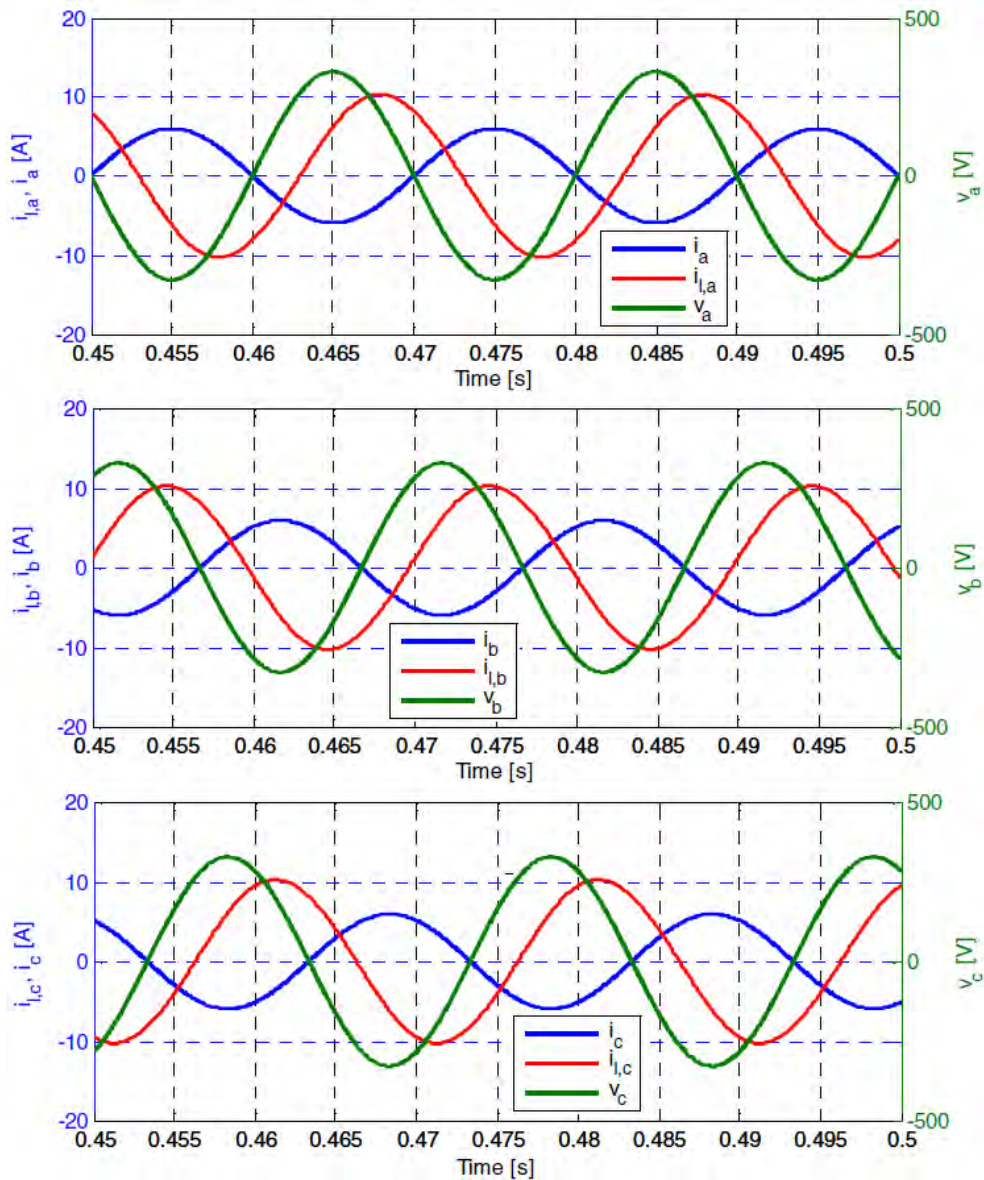
شکل ۷. نتایج شبیه سازی بار غیرخطی. الف) جریان بار غیر خطی. ب) جریان تزریق شده توسط مبدل سیستم فتوولتائیک. ج) جریان دریافتی بار از باس ریزشبه. د) ولتاژ باس AC ریزشبه.



۳-۵- عملکرد مبدل واسط سیستم فتوولتائیک در اصلاح ضریب قدرت ریزشبه

در این بخش عملکرد روش کنترل پیشنهادی برای مبدل واسط سیستم فتوولتائیک به منظور جبران ضریب توان بارهای پس فاز در ریزشبه ارائه شده است. در این حالت بار ریزشبه یک بار سه فاز پس فاز با میزان تقاضای توان های اکتیو و راکتیو 3.5kw و 5kvar در نظر گرفته شده است. به منظور مشاهده عملکرد مبدل واسط سیستم فتوولتائیک نتایج این حالت شامل جریان بار پس فاز، جریان دریافتی از ریزشبه و ولتاژ ریزشبه برای هر فاز بطور جداگانه در شکل ۸ ارائه شده است. مقایسه اختلاف فاز بین جریان بار و جریان دریافتی از ریزشبه نشان می دهد که جریان تولیدی مبدل سیستم فتوولتائیک به گونه ای کنترل شده است که ضریب توان در باس AC ریزشبه دارای مقدار واحد باشد.

شکل ۸. جریان و ولتاژ فازهای ریزشبه در حالت اصلاح ضریب توان توسط کنترل مبدل واسط سیستم فتوولتائیک



۶- نتیجه گیری

در این مقاله هدف طراحی یک سیستم کنترلی بهینه برای مبدل واسط سیستم فتوولتائیک به منظور جبران اغتشاشات ایجاد شده توسط بار و بهبود کیفیت توان ریزشیکه در حالت عملکرد جزیره‌ای بوده است. در این راستا پس از معرفی ساختار کلی طرح کنترل پیشنهادی، با توجه به ماهیت غیرخطی و نامتعادل بار از روش بهینه‌سازی تجمع ذرات با ضرایب متغیر با زمان برای تعیین ضرایب بهینه کنترلر استفاده شد. در ادامه به منظور مشاهده عملکرد طرح کنترل پیشنهادی نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB برای سه سناریو متفاوت ارائه گردید. با توجه به میزان تقاضای بار و ظرفیت در نظر گرفته شده برای سیستم فتوولتائیک در شرایط بارگذاری غیرخطی، میزان مشارکت سیستم فتوولتائیک در تأمین تقاضای بار به گونه‌ای

است که مقداری از انرژی مورد نیاز بار توسط دیگر منابع تولید پراکنده موجود در ریزشبهه تأمین می‌گردد. در این حالت عملکرد مبدل به گونه‌ای است که جریان دریافتی از باس AC ریزشبهه یک جریان سینوسی و متعادل است. در شرایط بارگذاری نامتعادل در ریزشبهه جریان تولیدی مبدل سیستم فتوولتائیک به گونه‌ای است که اثر نامتعادلی بارها توسط این سیستم جبران شده و توان دریافتی از باس AC ریزشبهه در هر سه فاز برابر است. همچنین با توجه به نتایج ارائه شده برای عملکرد کنترل کننده در اصلاح ضریب قدرت ریزشبهه مشخص شده است که در حضور بارهای پس‌فاز، ضریب قدرت ریزشبهه دارای مقداری نزدیک به واحد می‌باشد. در واقع در این حالت بخشی از ظرفیت سیستم فتوولتائیک به تولید توان راکتیو مورد نیاز بار اختصاص شده و مبدل واسط سیستم فتوولتائیک به عنوان یک جبران‌کننده موازی در ریزشبهه عمل می‌کند. از اینرو با توجه به مزایای سیستم‌های فتوولتائیک به عنوان یک منبع انرژی پاک در ریزشبهه‌ها، با بکارگیری استراتژی کنترل مناسب می‌توان علاوه بر مشارکت در تأمین تقاضای بار ریزشبهه، از این سیستم‌ها به منظور جبران اغتشاشات بار و بهبود کیفیت توان ریزشبهه‌ها در حالت عملکرد جزیره‌ای استفاده کرد.

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] H. Ibrahim, A. Ilinca and J. Perron, "Energy Storage Systems Characteristics and Comparisons," *Elsevier Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, pp. 1221-1250, 2008.
- [3] M. Prodanovic and T.C. Green "High-quality power generation through distributed control of a power park microgrid," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1471 –1482, oct 2006.
- [4] Yun Wei Li, D.M. Vilathgamuwa, and Poh Chiang Loh "A grid-interfacing power quality compensator for three-phase three-wire microgrid applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 4, pp. 1021–1031, July 2006.
- [5] D.M. Vilathgamuwa, Poh Chiang Loh, and Y. Li "Protection of microgrids during utility voltage sags," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1427 –1436, Oct 2009.
- [6] Xin Tang, K. M. Tsang, and W. L. Chan "A Power Quality Compensator With DG Interface Capability Using Repetitive Control," *IEEE Transactions on Energy conversion*, vol. 27, no. 2, June 2012.
- [7] T. Hornik, and Q. C. Zhong "H ∞ repetitive current controller for grid connected inverters," *35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, IECON*, pp. 554 –559, nov. 2009.
- [8] W. Al-Saedi, S. W. Lachwicz, D. Habibi, O. Bass, "Power Quality Enhancement in Autonomous Microgrid Operation Using Particle Swarm Optimization," *Elsevier, Electrical Power and Energy System*, vol.42, pp. 139-149 May 2012.
- [9] Q. Zhong, "Robust Droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol.60, no.4, pp. 1281-1290, 2013.

[11] حق‌شناس، مرتضی. حاجی‌بابایی، محمد. عبادیان، محمود و شریعتی‌نسب، رضا (۱۳۹۲)، "بهبود کیفیت توان سیستم‌های فتوولتائیک توسط استراتژی کنترلی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی فاخته" ششمین کنفرانس نیروگاه‌های برق ایران (EPGC2014)، تهران، نیروگاه طرشت.

- [11] P. L. Salvador, P. Salmeron, J. R. Vazquez and J. L. Flores, "Compensation of Voltage Unbalance and Current Harmonics with a Series Active Power Filters," *International Conference on Renewable Energies and Power Quality – ICREPQ*, Zaragoza, March 2005.
- [12] L. Xiong, F. Zhuo, M. Zhu, "Study on the Compound Cascaded STATCOM and Compensating for 3-phase Unbalanced Loads," *Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, PP. 3209 - 3215, 2013.
- [11] [حقوق شناس، مرتضی، عبادیان، محمود. (۱۳۹۲)، "بهبود عملکرد STATCOM مبتنی بر کنترل فازی به منظور بالانس بار و بهبود کیفیت توان در ریزشکته‌های مستقل" بیست و هشتمین کنفرانس بین المللی برق (PSC 2013)، تهران-ایران.
- [14] San-Yi Lee, Chi-Jui Wu, Wei-Nan Chang, "A compact control algorithm for reactive power compensation and load balancing with static Var Compensator," *Electric Power System Research*, vol. 58, no. 2, pp. 63-70, June 2001.
- [15] L. M. Castro, E. Acha, C. R. Fuerte, "A Novel STATCOM Model for Dynamic Power System Simulations," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 28, no. 3, august 2013.
- [16] Wei Jiang, Yu-fei Zhou, Jun-ning Chen, "Modeling and simulation of boost converter in CCM and DCM," *2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS)*, 2009.
- [17] M. Ucara and E. Ozdemir "Control of a 3-phase 4-leg active power filter under non-ideal mains voltage condition," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, pp. 58-73, January 2008.
- [18] B.S. Chen and G. Joos, "Direct Power Control of Active Filters With Averaged Switching Frequency Regulation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, pp. 2729 - 2737, November 2008.
- [19] A. Zhikang, S. Wenji Z. Ruixiang and F. Chunming Tu "Development of Hybrid Active Power Filter Based on the Adaptive Fuzzy Dividing Frequency-Control Method," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, pp. 424 - 432, January 2009.
- [20] P. Karuppanan, M. KamalaKanta, "PLL with PI, PID and Fuzzy Logic Controllers based Shunt Active Power Line Conditioners" *IEEE PEDES- International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems-2010*.
- [21] J. Kennedy, R. Eberhart, "Particle swarm optimization," *IEEE International Conference on Neural Networks Proceedings*, vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.
- [22] D. Dos, "Optimal placement of capacitors in radial distribution system using a Fuzzy-GA method," *Electrical Power and Energy systems*, vol. 30, No. 6, pp. 361-367, 2008.