

بهبود روش کنترلی اینورتر ترکیبی متصل به شبکه به منظور تزریق توان اکتیو و بهبود کیفیت توان در شرایط اغتشاش ولتاژ

سجاد یاری القار^۱ علیرضا جلیلیان^۲ محمدعلی شمسی‌نژاد^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران
sajad_yarialghar@iust.ac.ir

۲- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران
jalilian@iust.ac.ir

۳- استاد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران
Mshamsi@birjand.ac.ir

چکیده: در این مقاله با تغییر ساختار کنترلی اینورتر ترکیبی، عملکرد آن بهبود داده شده است. اینورتر خورشیدی ترکیبی بخاطر داشتن فیلتر LC کنترل شده با ترستور به ولتاژ DC کمی برای عملکرد نیاز دارد. این نوع اینورتر با روش تئوری توان راکتیو لحظه-ای کنترل می‌شود. از آنجاییکه تئوری توان راکتیو لحظه‌ای در ولتاژ اغتشاش شبکه عملکرد درستی ندارد، تحت این شرایط اینورتر ترکیبی نمی‌تواند بخوبی عمل تزریق توان اکتیو و جبران‌سازی را انجام دهد. بنابراین در این مقاله از روش کنترلی جایگزین فیلتر دیجیتال بازگشتی استفاده می‌شود تا اینورتر ترکیبی در شرایط شبکه ضعیف عملکرد داشته باشد. در این روش جایگزین، با محاسبه الگوهای واحد ولتاژ، اثر اغتشاشات ولتاژ روی سیستم کنترل حذف می‌شود. هم‌چنین برای جداسازی مولفه هارمونیک جریان بار از مولفه اصلی از فیلتر دیجیتال بازگشتی استفاده شده است. دو روش کنترلی تئوری توان راکتیو لحظه‌ای و فیلتر دیجیتال بازگشتی در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی و نتایج مقایسه شده‌اند. نتایج مقایسه نشان می‌دهد با استفاده از روش فیلتر دیجیتال بازگشتی، نه تنها اینورتر ترکیبی می‌تواند در کنار تزریق توان اکتیو بهبود کیفیت توان را نیز داشته باشد، بلکه در شرایط ولتاژ اغتشاش شبکه نیز عملکرد خوبی را دارد. هم‌چنین، مزیت ولتاژ DC کم اینورتر ترکیبی نیز حفظ می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اینورتر خورشیدی، بهبود کیفیت توان، تئوری توان راکتیو لحظه‌ای، فیلتر دیجیتال بازگشتی، ولتاژ لینک DC، ولتاژ اغتشاش شبکه

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.20.4.2509

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۳

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علیرضا جلیلیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران، تهران، رسالت، خیابان هنگام، خیابان دانشگاه، دانشگاه علم و صنعت ایران

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر به‌منظور تامین تقاضای انرژی الکتریکی، گرایش به سمت منابع انرژی تجدیدپذیر در سطوح ولتاژ کم و متوسط، افزایش یافته است. استفاده بیش از حد از سوخت‌های فسیلی باعث شده تأثیرات گازهای گلخانه‌ای بر طبیعت شدیدتر شود. منابع فتوولتاییک، جایگزین‌های بسیار مناسبی برای تولید انرژی الکتریکی هستند [۲، ۱]. سیستم‌های فتوولتاییک متصل به شبکه، به اینورتر قدرت بعنوان واسط بین آرایه فتوولتاییک و شبکه قدرت نیاز دارند. در مرجع [۳]، اینورتر-های تکفاز متصل به شبکه بطور دقیق دسته‌بندی شده‌اند. در مرجع [۴]، برای یک اینورتر تکفاز متصل به شبکه، یک خازن با هر کلید قدرت موازی شده و باعث شده تا کلیدزنی نرم براحتی صورت پذیرد و تلفات کلیدزنی کاهش پیدا کند.

اغتشاشات کیفیت توانی می‌توانند بصورت هرگونه انحراف در ولتاژ، جریان یا فرکانس شبکه باشند که باعث عملکرد نادرست تجهیزات الکتریکی می‌شود. با افزایش استفاده از دستگاه‌های الکتریکی غیرخطی بر مبنای الکترونیک قدرت، از قبیل مبدل‌ها، درایوها، یکسوسازهای توان بالا، منابع تغذیه سویچینگ و غیره، مشکلات کیفیت توانی شبکه زیاد شدند [۵-۷]. از دهه ۱۹۴۰ میلادی که اولین فیلترهای غیرفعال قدرت ابداع شدند، این فیلترها بطور گسترده برای جبران هارمونیک‌ها و توان راکتیو شبکه استفاده شدند. قیمت این ساختارها و پیچیدگی آنها بسیار کم بوده اما عیب‌هایی مانند عملکرد دینامیکی ضعیف، مشکلات تشدید و تغییر مشخصه فیلتر بر اثر تغییر پارامترهای سیستم دارند [۹]. در سال ۱۹۷۶ مفهوم فیلتر فعال قدرت برای بهبود برخی پارامترهای کیفیت توانی شبکه معرفی شد. این فیلترها عیوب فیلتر غیرفعال را پوشش می‌دادند اما هزینه اولیه این فیلترها زیاد و هم‌چنین کنترل آنها مشکل بود. بنابراین برای کاهش هزینه فیلتر فعال و هم‌چنین کاهش مشکلات فیلتر غیرفعال، فیلترهای ترکیبی برای بهبود کیفیت توان ارائه شدند. در میان این ساختارهای ترکیبی، ساختار فیلتر فعال به همراه فیلتر غیرفعال LC سری مورد توجه بیشتری قرار گرفت. با استفاده از این فیلتر ترکیبی، بخش اینورتری ولتاژ لینک DC کمتری برای عملکرد نیاز خواهد داشت [۱۰]. اما چنین ساختاری دارای محدوده جبران توان راکتیو کوچک است [۱۱]. برای حل این مشکل، در مرجع [۱۲] ساختار جدیدی معرفی شد. این ساختار از یک فیلتر LC کنترل‌شده با ترستور بهره می‌برد. فیلتر فعال عادی برای عملکرد نیاز به لینک DC با ولتاژ بالا دارد. فیلتر ترکیبی با فیلتر LC نیز محدوده جبران توان راکتیو کمی دارد. اما این فیلتر هر دو عیب را پوشش می‌دهد. در مرجع [۱۳] یک فیلتر LCL در خروجی فیلتر فعال قدرت استفاده شده. در مرجع [۱۴]، یک روش ساده‌تر برای تعیین ولتاژ لینک DC ساختار فیلتر ترکیبی کنترل‌شده با ترستور معرفی شده که نیاز به الگوریتم‌های FFT را از بین می‌برد. در مرجع [۱۵]، مشکلات کیفیت توانی بوجود آمده ناشی از کوره قوس

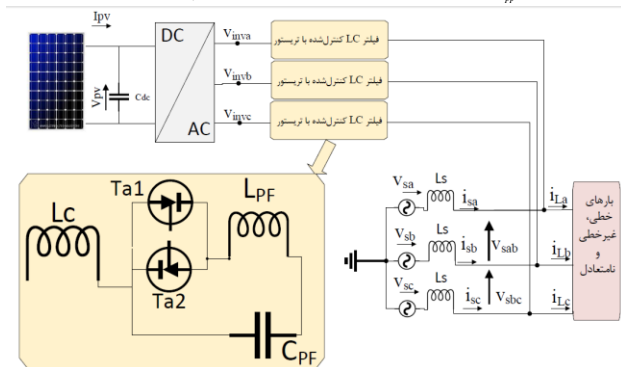
الکتریکی با استفاده از UPQC کاهش یافته. مرجع [۱۶] یک روش جدید برای کنترل UPFC را به کمک کلیدزنی هیستریزس ارائه می‌دهد. این روش جدید دارای چهار درجه آزادی است و می‌تواند ولتاژ باس بار، ولتاژ DC و توان اکتیو و راکتیو خط را کنترل کند. در [۱۷] نیز یک روش کنترل برای UPFC ارائه شده است. این کنترل‌کننده پارامترهای توان عبوری از خط، ولتاژ DC و ولتاژ پایانه ماشین سنکرون را کنترل می‌کند. هم‌چنین از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی کنترل‌کننده استفاده شده است. در [۱۸]، یک کنترل‌کننده مدل مرجع برای UPFC ارائه شده است. پارامترهای این کنترل‌کننده با استفاده از الگوریتم حرکت تجمعی ذرات به طور بهینه تنظیم شده‌اند.

با توجه به اینکه هم سیستم‌های خورشیدی متصل به شبکه و هم انواع فیلترهای فعال، ساختاری اینورتری دارند، در بسیاری از مطالعات سعی بر این بوده که عملکرد این دو سیستم را باهم مجتمع کنند. بدین معنی که یک اینورتر خورشیدی متصل به شبکه، نه‌تنها تزریق توان اکتیو انجام دهد، بلکه با استفاده از ظرفیت اضافی، بهبود کیفیت توان را نیز داشته باشد. بدین ترتیب، حتی در شب که اینورتر هیچ توان اکتیوی تزریق نمی‌کند، بهبود کیفیت توان می‌تواند ادامه داشته باشد و بنابراین ضریب استفاده اینورتر افزایش می‌یابد. در مرجع [۱۹]، روش‌های مختلف کنترل اینورتر خورشیدی برای جبران توان راکتیو هم‌زمان با تزریق توان اکتیو ارائه شده. مرجع [۲۰]، عملکرد سیستم مجتمع‌شده را به سه حالت مختلف تقسیم می‌کند. حالت اول فقط تزریق توان اکتیو را دارد. حالت دوم تزریق توان اکتیو به‌همراه جبران بخشی از هارمونیک‌ها را دربر می‌گیرد. حالت سوم تزریق توان اکتیو و جبران هارمونیک‌ها را با ضریب THD مشخص بررسی می‌کند. مرجع [۲۱] از فیلترهای حذف نویز تطبیقی برای کنترل سیستم مجتمع‌شده استفاده می‌کند. در مرجع [۲۲] استفاده از اینورترهای چندسطحی برای اتصال مزرعه خورشیدی به شبکه ارائه شده است. در این مرجع، یک روش کنترل غیرخطی مستقیم برای این اینورترها با فیلتر خروجی LCL بررسی شده است که با این روش کنترل می‌تواند ولتاژ پایانه‌های DC اینورتر را به صورت مستقل کنترل کرد. در مرجع [۲۳]، یک ساختار جدید با استفاده از ترانسفورماتور فرکانس بالا برای اینورترهای شبه منبع امیدانسی ارائه شده است. مزایای استفاده از ترانسفورماتور فرکانس بالا ایجاد ایزولاسیون الکتریکی بین ورودی و خروجی، افزایش ولتاژ خروجی، افزایش قابلیت اطمینان سیستم و کاهش تداخلات الکترومغناطیسی می‌باشد. در مرجع [۲۴]، از یک جبران‌ساز دینامیکی توان راکتیو با اتصال مثلث، موازی با اینورتر خورشیدی با فیلتر LC کنترل‌شده با ترستور برای تزریق توان اکتیو و بهبود کیفیت توان استفاده شده. مرجع [۲۵] یک روش کنترل جدید برای سیستم مجتمع‌شده ارائه داده است. این مقاله از یک فیلتر دیجیتال بازگشتی استفاده کرده تا مولفه اصلی جریان بار را از مولفه‌های هارمونیک جدا کند. از مزایای استفاده از این فیلتر می‌توان به سادگی آن و عدم

$$S_{base} = \frac{V_{sx}^2}{X_{TCLC}(\alpha)} \quad (2)$$

در رابطه ۲، X_{TCLC} امپدانس فیلتر کنترل شده با تریستور است که تابعی از زاویه آتش تریستورها می‌باشد. این امپدانس از رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$X_{TCLC}(\alpha) = \frac{X_{TCR}(\alpha)X_{CPF}}{X_{CPF} - X_{TCR}(\alpha)} + X_{Lc} = \frac{\pi X_{Lpf} X_{CPF}}{X_{CPF}(2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)) - \pi X_{Lpf}} + X_{Lc} \quad (3)$$



شکل (۱): پیکره بندی اینورتر ترکیبی متصل به شبکه

در رابطه ۳، α زاویه آتش تریستور، X_{Lpf} امپدانس سلف L_{PF} ، X_{CPF} امپدانس خازن C_{PF} و X_{Lc} امپدانس سلف L_c است. کمترین زاویه آتش می‌تواند ۹۰ درجه باشد و بیشترین زاویه آتش ۱۸۰ درجه. با کنترل امپدانس فیلتر کنترل شده با تریستور، درحقیقت مقدار S_{base} کنترل می‌شود. طبق معادله ۱ نیز می‌توان دریافت که با کنترل S_{base} می‌توان نسبت ولتاژ V_{invx}/V_{sx} را تغییر داد. برای محاسبه کمترین نسبت V_{invx}/V_{sx} برحسب S_{base} از معادله ۱ مشتق گرفته آن را برابر صفر قرار می‌دهیم [۲۶]:

$$\frac{\partial(V_{invx}/V_{sx})}{\partial S_{base}} = 0 \Rightarrow S_{base} = \frac{P_{cx}^2 + Q_{cx}^2}{Q_{cx}} \quad (4)$$

$$S_{base} \in [V_{sx}^2 / X_{TCLC}(\alpha = 180), V_{sx}^2 / X_{TCLC}(\alpha = 90)] \quad (5)$$

اگر مقدار S_{base} بدست آمده از رابطه ۴ در بازه ۵ معادله ۵ باشد، نسبت V_{invx}/V_{sx} می‌تواند با جایگذاری این مقدار S_{base} در رابطه ۱ محاسبه شود. با احتساب پارامترهای جدول ۱، معادله ۱ در نرم‌افزار متلب نوشته و نسبت V_{invx}/V_{sx} رسم شده است. هم‌چنین مقدار این نسبت برای اینورتر متصل به شبکه با سلف نیز محاسبه شده است. شکل ۲ نتیجه این رسم را نشان می‌دهد. در شکل ۲ مشاهده می‌شود در اینورتر متصل به شبکه با سلف (شکل ۲-الف) نسبت V_{invx}/V_{sx} حدود ۱ است اما در اینورتر ترکیبی (شکل ۲-ب) این نسبت، اگر شرط معادله ۵ برقرار باشد، کمتر یا مساوی ۱ است. بنابراین اینورتر ترکیبی می‌تواند با ولتاژ لینک DC کمتری کار کند [۲۶].

۴- کنترل اینورتر ترکیبی

کنترل اینورتر ترکیبی را می‌توان به دو بخش کنترل تریستورها و فیلتر کنترل شده با تریستور و بخش کنترل اینورتر فعال تقسیم‌بندی کرد. در ادامه ابتدا کنترل تریستورها تشریح و سپس روش تئوری توان

استفاده از الگوریتم‌های حلقه قفل فاز، استفاده از یک مسیر پسخور برای بهبود پاسخ دینامیکی و تزریق توان اکتیو به شبکه و عملکرد در شرایط ضعیف شبکه از قبیل افزایش یا کاهش ولتاژ، ولتاژ هارمونیک و ولتاژ نامتعادل شبکه نام برد. در مرجع [۲۶]، ساختار فیلتر فعال ترکیبی کنترل شده با تریستور با یک اینورتر خورشیدی مجتمع شده است. نتایج مقاله نشان می‌دهد ساختار مذکور می‌تواند در ولتاژ DC بسیار کمتری نسبت به ساختارهای دیگر تزریق توان اکتیو و بهبود کیفیت توان را داشته باشد.

در این مقاله، از فیلتر دیجیتالی معرفی شده در [۲۵] استفاده شده تا ساختار اینورتر ترکیبی کنترل شده با تریستور متصل به شبکه [۲۶] بهبود یابد. روش کنترل استفاده شده در [۲۶]، تئوری توان راکتیو لحظه‌ای می‌باشد که این روش کنترلی برای عملکرد درست نیاز به ولتاژ سینوسی خالص دارد. اما با استفاده از روش کنترل [۲۵]، این سیستم می‌تواند در شرایط مغتشش ولتاژ شبکه نیز کاربرد داشته باشد. در ادامه مقاله، از ساختار اینورتر متصل به شبکه با فیلتر کنترل شده با تریستور با نام اینورتر ترکیبی یاد خواهد شد. ادامه بخش‌های این مقاله عبارتند از: بخش ۲ معرفی پیکره‌بندی اینورتر ترکیبی، بخش ۳ بررسی روابط اینورتر ترکیبی، بخش ۴ کنترل اینورتر ترکیبی، بخش ۵ شبیه‌سازی و بخش ۶ نتیجه‌گیری می‌باشد.

۲- پیکره‌بندی سیستم

تصویر ۱، ساختار اینورتر ترکیبی متصل به شبکه را نشان می‌دهد. پارامترهای این سیستم عبارتند از: V_{sa} ، V_{sb} ، V_{sc} به ترتیب ولتاژهای فاز به زمین شبکه در فازهای a، b، c و V_{sab} و V_{sbc} ولتاژهای فاز به فاز شبکه، I_{La} ، I_{Lb} و I_{Lc} به ترتیب جریان‌های بار در فازهای a، b، c و V_{pv} ولتاژ خازن لینک DC اینورتر و هم‌چنین ولتاژ خروجی آرایه خورشیدی و I_{pv} جریان خروجی آرایه خورشیدی. پارامترهای V_{inva} ، V_{invb} و V_{invc} نیز ولتاژهای پایانه خروجی اینورتر در فازهای a، b و c است. L_{PF} سلف کنترل شده با تریستور، C_{PF} خازن سری و L_c سلف سری فیلتر خروجی اینورتر می‌باشد.

۳- بررسی روابط اینورتر ترکیبی

ساختار اینورتر ترکیبی با توجه به استفاده از فیلتر LC کنترل شده با تریستور، ولتاژ لینک DC کمی برای عملکرد نیاز دارد. رابطه ۱، نسبت ولتاژ V_{invx} را برحسب V_{sx} تعیین می‌کند [۲۶].

$$\frac{V_{invx}}{V_{sx}} = \sqrt{\left(\frac{P_{cx}}{S_{base}}\right)^2 + \left(\frac{Q_{cx}}{S_{base}} - 1\right)^2} \quad (1)$$

در رابطه ۱، x می‌تواند هر کدام از فازهای a، b و c باشد. P_{cx} و Q_{cx} مقدار توان اکتیو و راکتیوی است که از فیلتر در هر فاز عبور می‌کند. پرواضح است که هرچه نسبت فوق کمتر از ۱ باشد، اینورتر به ولتاژ لینک DC کمتری برای عملکرد درست نیاز دارد. در رابطه ۱، S_{base} از فرمول ۲ بدست می‌آید [۲۶]:

با جایگذاری نتیجه روابط ۷ و ۸ در فرمول ۶، امپدانس مورد نیاز فیلتر LC کنترل شده با تریستور بدست می‌آید. با این امپدانس، می‌توان از رابطه ۳ زاویه آتش را محاسبه کرد. اما چون این رابطه غیرخطی است، از یک جدول جست‌وجو برای محاسبه زاویه آتش استفاده می‌شود [۲۶].

۴-۲- کنترل اینورتر با تئوری توان راکتیو لحظه‌ای

برای کنترل اینورتر با تئوری توان راکتیو لحظه‌ای، ابتدا با استفاده از تبدیل کلارک، ولتاژ شبکه و جریان بار به حوزه $\alpha\beta$ برده می‌شود. رابطه ۹ این تبدیل را نشان می‌دهد [۲۶]:

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

در رابطه ۹ متغیر f می‌تواند ولتاژ یا جریان باشد. با داشتن ولتاژ و جریان در حوزه $\alpha\beta$ ، توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای در حوزه $\alpha\beta$ محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$\begin{bmatrix} p_{\alpha\beta} \\ q_{\alpha\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰، توان اکتیو و راکتیو از دو بخش ثابت و نوسانی تشکیل شده‌اند. پارامترهایی که باید جبران شوند عبارتند از بخش نوسانی توان اکتیو (که نماینده هارمونیک‌های مولفه اکتیو جریان بار است)، بخش ثابت توان راکتیو (که نماینده توان راکتیو مولفه اصلی جریان بار است) و بخش نوسانی توان راکتیو (که نماینده توان راکتیو هارمونیک‌های بار است). بنابراین با عبور دادن توان اکتیو از یک فیلتر بالاگذر، مولفه نوسانی محاسبه می‌شود. فرمول ۱۱ محاسبه این مولفه را نشان می‌دهد.

مولفه دیگر توان اکتیوی که اینورتر باید تزریق کند، بخشی است که باید تلفات خازن را جبران کند و ولتاژ خازن را تثبیت کند. این بخش بدین صورت بدست می‌آید که ولتاژ خازن با مقدار مرجع مقایسه می‌شود. کنترل کننده PI خطای ولتاژ را گرفته و متناسب با آن سیگنال توان اکتیو لازم را برای تثبیت ولتاژ خازن را تولید می‌کند. فرمول ۱۲ محاسبه این مولفه را نشان می‌دهد.

سومین بخش از توان اکتیو که اینورتر باید تزریق کند، توان تولیدی آرایه خورشیدی است. این توان از حاصل ضرب ولتاژ آرایه خورشیدی در جریان آن بدست می‌آید. فرمول ۱۳ محاسبه این مولفه را نشان می‌دهد. [۲۶]

$$p_{\alpha\beta} = HPF(p_{\alpha\beta}) \quad (11)$$

$$P_{loss} = K_p \times (V_{dref} - V_{dc}) + K_i \int (V_{dref} - V_{dc}) dt \quad (12)$$

$$P_{pv} = V_{pv} \times I_{pv} \quad (13)$$

در رابطه ۱۱ تا ۱۳، HPF به معنای فیلتر بالاگذر مورد استفاده برای استخراج مولفه نوسانی توان اکتیو لحظه‌ای است. $p_{\alpha\beta}$ بخش نوسانی توان اکتیو لحظه‌ای، P_{loss} نماینده توان اکتیو برای تثبیت ولتاژ خازن، P_{pv} توان اکتیو تولیدی آرایه خورشیدی، V_{pv} ولتاژ و I_{pv} جریان

راکتیو لحظه‌ای برای کنترل اینورتر بررسی می‌شود. از آنجاییکه این تئوری قابلیت عملکرد در ولتاژهای مغتشش شبکه را ندارد، فیلتر دیجیتالی بعنوان روش جایگزین برای تئوری توان راکتیو لحظه‌ای معرفی می‌شود.

۴-۱- کنترل تریستورها

پارامترهایی که زاویه آتش را تعیین می‌کنند، توان اکتیو و راکتیو تزریقی و هم‌چنین نرُم ولتاژ شبکه هستند. این پارامترها با رابطه ۶ به امپدانس فیلتر مربوط می‌شوند [26]:

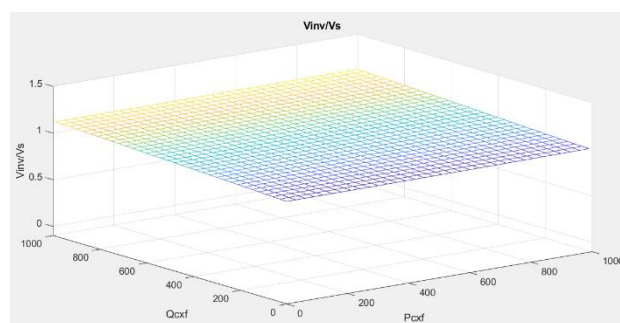
$$X_{TCLC}(\alpha) = \frac{Q_{cxf} V_{sf}^2}{P_{cxf}^2 + Q_{cxf}^2} = \frac{\|v^2\|}{\sqrt{3}} \frac{q_{Lx}/2}{q_{Lx}/2 + P_{cxf}^*} \quad (6)$$

در رابطه ۶، $\|v^2\|$ نرُم ولتاژ شبکه، P_{cxf}^* یک سوم توان اکتیو تولیدی توسط آرایه خورشیدی و $\|q_{Lx}\|$ مقدار مولفه dc توان راکتیو شبکه است. این مقادیر با عبور دادن نتیجه روابط ۷ و ۸ از یک فیلتر پایین‌گذر بدست می‌آیند [۲۶]:

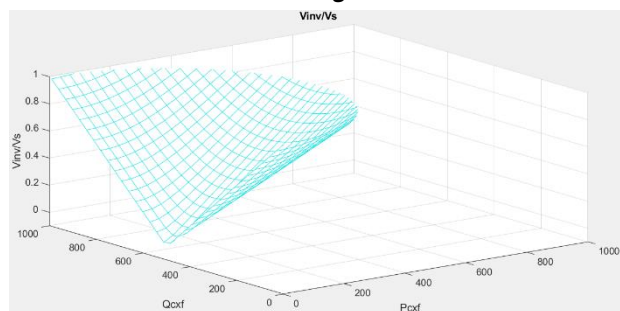
$$\|v\| = \sqrt{v_{sa}^2 + v_{sb}^2 + v_{sc}^2} \quad (7)$$

جدول (۱): مقادیر پارامترهای فیلتر کنترل شده با تریستور [۲۶]

$L = 5\text{mH}$	اینورتر متصل به شبکه با سلف
$L_c = 5\text{mH}, L_{pf}=38\text{mH}, C_{pf}=120\mu\text{F}$	اینورتر ترکیبی



شکل (۲) الف



شکل (۲) ب

شکل (۲): الف، نسبت V_{invx}/V_{sx} برای اینورتر متصل به شبکه با سلف و ب، همان نسبت برای اینورتر ترکیبی

$$\begin{bmatrix} qLa \\ qLb \\ qLc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sb} i_{Lc} - v_{sc} i_{Lb} \\ v_{sc} i_{La} - v_{sa} i_{Lc} \\ v_{sa} i_{Lb} - v_{sb} i_{La} \end{bmatrix} \quad (8)$$

اکتیو باشد. برای این کار از یک بلوک نمونه‌بردار و نگهدار استفاده می‌کنیم. پالس فعال‌سازی بلوک نمونه‌بردار و نگهدار از سیگنال U_q می‌آید. سیگنال‌های U_p و U_q با روابط ۱۷ تا ۲۰ محاسبه می‌شوند [25]:

$$v_a = (2v_{sab} + v_{sbc})/3 \quad (17)$$

$$v_b = (-v_{sab} + v_{sbc})/3$$

$$v_c = (-v_{sab} - 2v_{sbc})/3$$

$$V_i = \sqrt{\frac{2(V_a^2 + v_b^2 + v_c^2)}{3}} \quad (18)$$

$$U_{pa} = \frac{v_a}{V_i}, U_{pb} = \frac{v_b}{V_i}, U_{pc} = \frac{v_c}{V_i} \quad (19)$$

$$U_{qa} = \frac{-U_{pb} + U_{pc}}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

$$U_{qb} = \frac{3U_{pa} + U_{pb} - U_{pc}}{2\sqrt{3}}$$

$$U_{qc} = \frac{-3U_{pa} + U_{pb} - U_{pc}}{2\sqrt{3}}$$

با عبور سیگنال خروجی فیلتر دیجیتال از بلوک نمونه‌بردار و نگهدار، و سپس قدم‌مطلق‌گیری از آن، مولفه توان اکتیو فرکانس اصلی جریان بار محاسبه می‌شود. بطور مشابه برای فازهای دیگر نیز سیگنال اکتیو مولفه اصلی جریان بار محاسبه می‌شود. پس از محاسبه جریان اکتیو مولفه اصلی هر سه فاز، این جریان‌ها باهم جمع شده و سپس تقسیم بر ۳ می‌شوند تا مقدار میانگین بدست آید. این اولین جزء تشکیل‌دهنده جریان مرجع است [25].

دومین جزء تشکیل‌دهنده جریان مرجع، جریانی است که باید ولتاژ خازن DC را کنترل کند. مقدار ولتاژ خازن با مرجع ولتاژ مقایسه شده، خطا به یک کنترل‌کننده PI داده می‌شود. خروجی کنترل‌کننده PI، جریان است [25].

سومین جزء تشکیل‌دهنده جریان مرجع، جریان نماینده توان اکتیو سیستم خورشیدی است. برای محاسبه این جریان، از رابطه ۲۱ استفاده می‌شود [25]:

$$I_{pv} = \frac{2P_{pv}}{3V_i} \quad (21)$$

با جمع سه سیگنال مولفه اصلی توان اکتیو جریان بار، جریان اصلاح‌کننده ولتاژ خازن و جریان نماینده توان اکتیو سیستم خورشیدی، مقدار پیک جریان مرجع محاسبه می‌شود [25]:

$$I = I_{fpL} + I_{Loss} - I_{pv} \quad (22)$$

سیگنال I ، مقدار پیک جریان شبکه را نشان می‌دهد. برای بدست آوردن جریان مرجع بصورت سینوسی، مقدار سیگنال I در U_p بدست آمده از فرمول ۱۹ ضرب می‌شود. بدین ترتیب جریان سه فاز سینوسی متعادل مرجع برای شبکه بدست می‌آید [25]:

$$i_{sa}^* = IU_{pa}, i_{sb}^* = IU_{pb}, i_{sc}^* = IU_{pc} \quad (23)$$

برای اینکه جریان شبکه، مرجع خود را دنبال کند، از کلیدزنی هیستریزس برای اینورتر استفاده شده است. شکل ۳، بلوک دیاگرام روش کنترلی فیلتر دیجیتال بازگشتی را نشان می‌دهد.

آرایه خورشیدی است. V_{dc} نیز ولتاژ خازن لینک DC و V_{dref} ولتاژ مرجع خازن است. ولتاژ مرجع، همان ولتاژ نقطه پیشینه توان پنل خورشیدی است. با توجه به اینکه یک سلول خورشیدی مشخصه توان برحسب ولتاژ غیرخطی دارد، نیاز است تا همیشه نقطه کار روی پیشینه توان اکتیو نگاه داشته شود. برای این کار، از الگوریتم‌های تعقیب نقطه پیشینه توان استفاده می‌شود. در این مقاله از الگوریتم هدایت افزایشی برای ردیابی نقطه پیشینه توان استفاده شده است. بنابراین توان اکتیو و راکتیو مرجع برای اینورتر بصورت معادلات ۱۴ و ۱۵ تعریف می‌شود [26]:

$$P_{ref} = P_{\alpha\beta} + P_{loss} + P_{pv} \quad (14)$$

$$Q_{ref} = q_{\alpha\beta} \quad (15)$$

با اعمال عکس تبدیل کلارک، جریان‌های مرجع برای اینورتر محاسبه می‌شوند [21]:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{\sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \end{bmatrix} \quad (16)$$

با استفاده از کلیدزنی هیستریزس، پالس‌های فعال‌سازی اینورتر بدست می‌آیند.

۴-۳- کنترل اینورتر ترکیبی با فیلتر دیجیتال بازگشتی

با توجه به اینکه روش تئوری توان راکتیو لحظه‌ای فقط در ولتاژهای سینوسی خالص شبکه عملکرد درست دارد، اگر ولتاژ شبکه مغتشش باشد، سیستم اینورتر ترکیبی کارایی خود را از دست خواهد داد. بنابراین در این بخش یک روش برای کنترل اینورتر ترکیبی جایگزین می‌شود تا این ساختار در ولتاژهای مغتشش شبکه نیز عملکرد درست داشته باشد.

برای کنترل اینورتر، باید جریان بار اندازه‌گیری شده، مولفه اصلی آن محاسبه شود. سپس طوری جریان اینورتر تزریق گردد که اغتشاشات جریان حذف شود و شبکه فقط جریان سینوسی خالص متعادل داشته باشد. برای جداسازی مولفه اصلی جریان بار از مولفه‌های هارمونیک، از فیلتر دیجیتال بازگشتی استفاده می‌شود. این فیلتر دیجیتال از خانواده فیلترهای دیجیتال متغیر است. یک مزیت مهم فیلتر دیجیتال متغیر، جایگزین کردن هر تاخیر واحد با یک ساختار تمام‌گذر است. این کار باعث می‌شود پیاده‌سازی فیلتر بسیار راحت باشد [25]. پارامترهای این فیلتر طبق [25] برابر مقادیر جدول ۲ انتخاب شده‌اند.

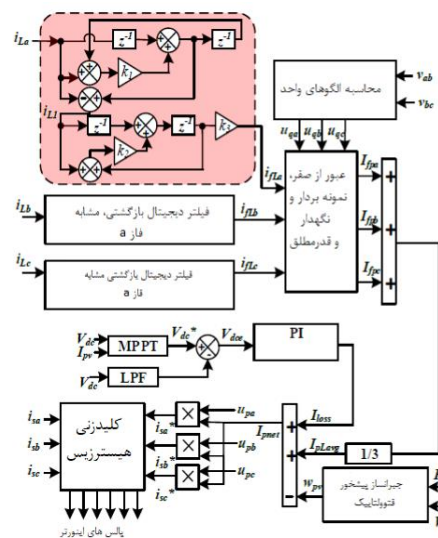
جدول (۲): مقادیر پارامترهای فیلتر دیجیتال بازگشتی [25]

k_1	0.9996
k_2	0.9974
k_3	10^{-5}

عملکرد فیلتر دیجیتال بدین صورت است که بصورت یک فیلتر میان‌گذر عمل کرده و مولفه اصلی جریان بار را از مولفه هارمونیک جدا می‌کند. سیگنال خروجی فیلتر دیجیتال، جریان مولفه اصلی بار است. این جریان مولفه اصلی باید بصورت جریان مولفه اصلی بخش

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی اینورتر ترکیبی با دو راهبرد کنترلی تئوری توان راکتیو لحظه‌ای و فیلتر دیجیتال بازگشتی ارائه می‌شود. تصویر ۴، عملکرد اینورتر ترکیبی با راهبرد تئوری توان راکتیو لحظه‌ای را در بار خطی نشان می‌دهد. همان‌طور که در بخش ۴-۲ گفته شد، با وجود ولتاژ سینوسی متعادل، اینورتر ترکیبی به خوبی جبران‌سازی را انجام می‌دهد. در تمام شکل‌های این بخش، به ترتیب از بالا به پایین جریان شبکه، جریان بار، ولتاژ شبکه و توان راکتیو بار و شبکه ارائه می‌شود. مشاهده می‌شود که جبران توان راکتیو در ولتاژ بدون اغتشاش با روش تئوری توان راکتیو لحظه‌ای به خوبی انجام می‌شود. به‌طوریکه توان راکتیو بار حدود 2000Var است اما توان راکتیو شبکه به حدود 100Var رسیده. تصویر ۵ و ۶، عملکرد اینورتر ترکیبی را با تئوری توان راکتیو لحظه‌ای، اما تحت ولتاژ مغتشش شبکه (به ترتیب نامتعادلی و هارمونیک ولتاژ) نشان می‌دهند. با توجه به اینکه جریان شبکه غیرسینوسی و نامتعادل است، نتیجه می‌شود که سیستم کنترل و بنابراین سیستم جبران‌سازی عملکرد درستی ندارد. برای رفع این مشکل از روش فیلتر دیجیتال بازگشتی استفاده می‌شود. شکل ۷ عملکرد اینورتر ترکیبی را با روش فیلتر دیجیتال، تحت بار خطی و کاهش ولتاژ شبکه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که جریان شبکه کاملاً سینوسی متعادل بوده و توان راکتیو نیز از حدود 2000Var به نزدیک 0 می‌رسد. که نشان از عملکرد درست سیستم کنترل دارد. شکل ۸ نمونه بهتر تاثیر

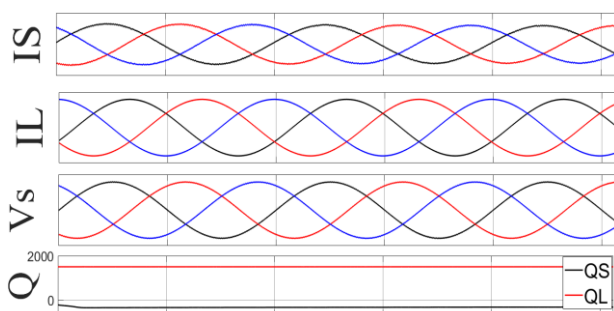


شکل (۳): بلوک‌دیگرام روش کنترلی فیلتر دیجیتال بازگشتی [۲۰]
روش کنترلی فیلتر دیجیتال بازگشتی را نشان می‌دهد. در این تصویر، بار خطی و ولتاژ شبکه هارمونیک است اما جریان شبکه کاملاً سینوسی باقی مانده و توان راکتیو نیز جبران شده است. در شکل ۹ جریان بار غیرخطی می‌شود اما مشاهده می‌شود که سیستم کنترل به خوبی عملکرد داشته و جریان شبکه کاملاً سینوسی است. همچنین، توان راکتیو نیز جبران شده است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ بدترین شرایط

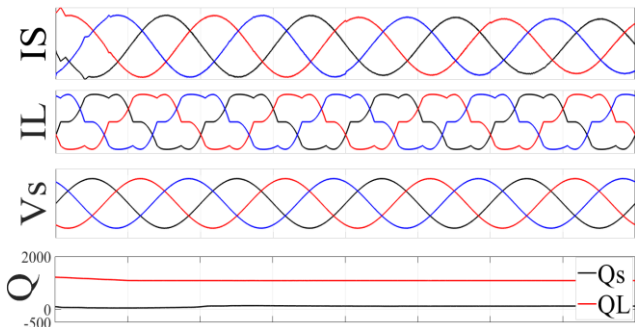
اغتشاش را نشان می‌دهند. در تصویر ۱۰ بار غیرخطی و ولتاژ هارمونیک شبکه و در تصویر ۱۱، بار نامتعادل و ولتاژ هارمونیک شبکه به اینورتر ترکیبی با فیلتر دیجیتال بازگشتی اعمال شده‌اند. در هر دو شکل ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود که جریان شبکه با وجود اغتشاشات بار و ولتاژ شبکه، هم‌چنان سینوسی متعادل باقی می‌ماند و توان راکتیو شبکه نیز به خوبی جبران می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سیستم کنترل تحت اغتشاشات ولتاژ عملکرد درستی دارد که در مورد تئوری توان راکتیو لحظه‌ای این امکان وجود ندارد. از آنجاییکه از ساختار اینورتر ترکیبی استفاده شده است، مزیت ولتاژ کم مورد نیاز برای لینک DC نیز حفظ می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

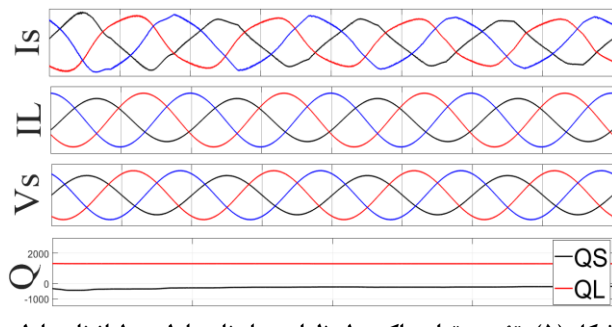
در این مقاله روش کنترلی ساختار اینورتر ترکیبی متصل به شبکه، به‌منظور عملکرد در شرایط شبکه ضعیف بهبود داده شد. اینورتر ترکیبی متصل به شبکه قابلیت تزریق توان اکتیو و جبران هارمونیک-ها، توان راکتیو و نامتعادلی بار را بطور هم‌زمان داراست. همچنین بخاطر استفاده از فیلتر LC کنترل‌شده با ترستور، ولتاژ DC کمتری نسبت به سایر ساختارهای متصل به شبکه مورد نیاز است. چراکه این فیلتر کنترل‌شده امپدانس قابل تنظیمی را در خروجی اینورتر ایجاد می‌کند که با انتخاب درست زاویه آتش ترستورها می‌توان ولتاژ DC مورد نیاز را کمینه کرد. برای ارتقا عملکرد اینورتر ترکیبی به‌منظور عملکرد صحیح در شرایط شبکه ضعیف، روش کنترلی فیلتر دیجیتال بازگشتی استفاده شد که باعث می‌شد ساختار در ولتاژهای مغتشش شبکه نیز عملکرد داشته باشد. برای اطمینان از عملکرد درست سیستم، اینورتر ترکیبی با فیلتر دیجیتال بازگشتی شبیه‌سازی شد و نتایج مقایسه شدند. مشاهده شد که اینورتر ترکیبی با فیلتر دیجیتال بخوبی در شرایط ولتاژ مغتشش شبکه عملکرد دارد و همچنین ولتاژ لینک DC کمی برای عملکرد مورد نیاز است.



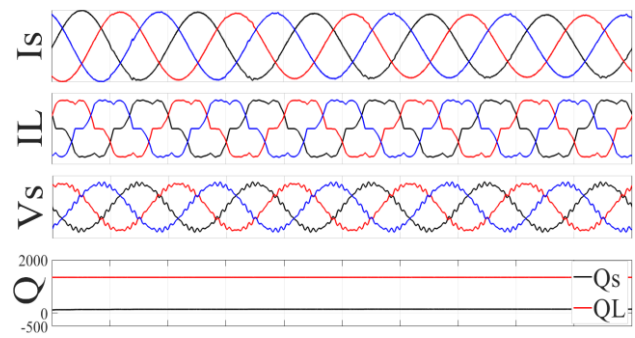
شکل (۴): تئوری توان راکتیو لحظه‌ای- بار خطی و ولتاژ بدون اغتشاش می‌باشد



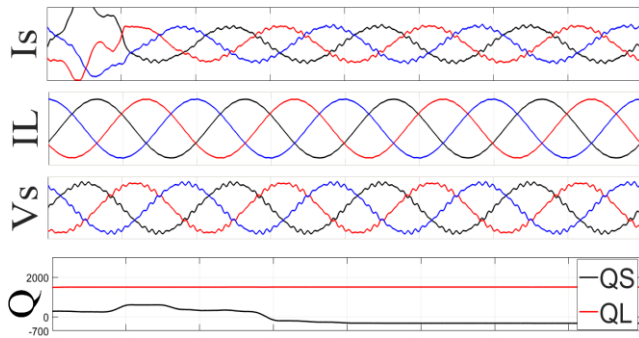
شکل (۹): فیلتر دیجیتال بازگشتی-بار غیرخطی - شبکه دچار کاهش ولتاژ



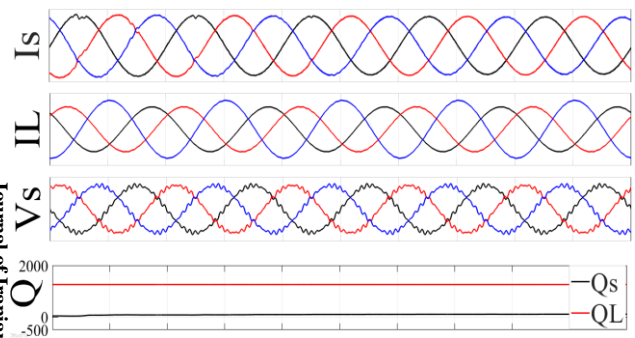
شکل (۵): تئوری توان راکتیو لحظه‌ای - بار نامتعادل و ولتاژ نامتعادل می‌باشد



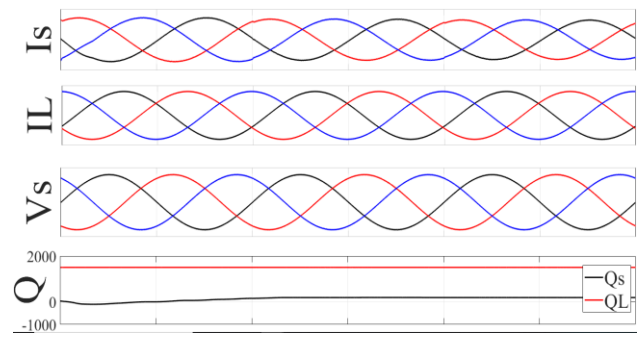
شکل (۱۰): فیلتر دیجیتال بازگشتی-بار غیرخطی - ولتاژ شبکه هارمونیک



شکل (۶): تئوری توان راکتیو لحظه‌ای - بار خطی و ولتاژ هارمونیک می‌باشد



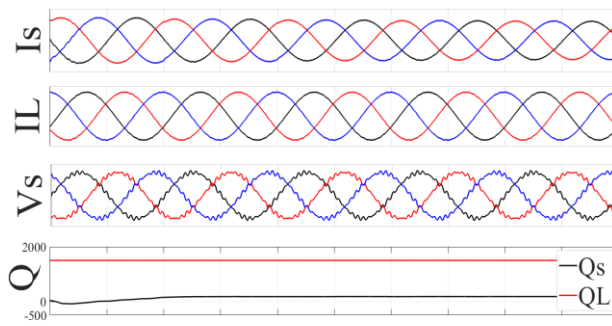
شکل (۱۱): فیلتر دیجیتال بازگشتی-بار نامتعادل - ولتاژ شبکه دارای هارمونیک



شکل (۷): فیلتر دیجیتال بازگشتی-بار خطی - شبکه دچار کاهش ولتاژ

مراجع

- [1] G. S. Chawda et al., "Comprehensive Review on Detection and Classification of Power Quality Disturbances in Utility Grid With Renewable Energy Penetration," in IEEE Access, vol. 8, pp. 146807-146830, 2020.
- [2] W. Li and X. He, "Review of Nonisolated High-Step-Up DC/DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 4, pp. 1239-1250, April 2011
- [3] M. N. H. Khan, M. Forouzesheh, Y. P. Siwakoti, L. Li, T. Kerekes and F. Blaabjerg, "Transformerless Inverter Topologies for Single-Phase Photovoltaic Systems: A Comparative Review," in IEEE Journal of Emerging and



شکل (۸): فیلتر دیجیتال بازگشتی-بار خطی - ولتاژ شبکه دارای هارمونیک

- [۱۶] رسولی دیسفانی وحید، عسکریان ابیانه حسین، محمدی رضا، رضوی فرزاد. "روشی نوین برای کنترل UPFC به کمک سوئیچینگ باند هیستریزس"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۵ (۱): ۵۰-۵۸، ۱۳۸۷.
- [۱۷] طاهر سید عباس، همتی رضا، عبدالعلی پور علی. "طراحی کنترل‌کننده‌های UPFC برای کنترل همزمان توان و ولتاژ با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۶ (۱): ۶۳-۷۲، ۱۳۸۸.
- [۱۸] همتی رضا، کوفیگر حمید رضا، عطایی محمد، "کنترل‌کننده تطبیقی مدل مرجع بهبود یافته نرمالیزه شده برای UPFC". نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۲ (۱): ۱۵۳-۱۳۹، ۱۳۹۴.
- [19] A. Dhaneria, "Grid Connected PV System with Reactive Power Compensation for the Grid," 2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2020, pp. 1-5.
- [20] A. V. Sant, V. Khadkikar, W. Xiao, H. Zeineldin and A. Al-Hinai, "Adaptive control of grid connected photovoltaic inverter for maximum VA utilization," IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013, pp. 388-393.
- [21] R. R. Chilipi, N. Al Sayari, A. R. Beig and K. Al Hosani, "A Multitasking Control Algorithm for Grid-Connected Inverters in Distributed Generation Applications Using Adaptive Noise Cancellation Filters," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 31, no. 2, pp. 714-727, June 2016.
- [۲۲] تودجی حمیدرضا، "استفاده از اینورتر چندسطحی با کنترل‌کننده غیرخطی مستقیم برای اتصال مزرعه خورشیدی به شبکه". نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۵ (۱): ۷۴-۶۵، ۱۳۹۷.
- [۲۳] سرای‌لو علی، برکاتی سید مسعود، "اینورتر چندسطحی آنبشاری شبه منبع امپدانس با استفاده از ترانسفورماتور فرکانس بالا". نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۶ (۱): ۱۳۱-۱۱۹، ۱۳۹۸.
- [24] L. Wang, C. Lam and M. Wong, "Multifunctional Hybrid Structure of SVC and Capacitive Grid-Connected Inverter (SVC//CGCI) for Active Power Injection and Nonactive Power Compensation," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 3, pp. 1660-1670, March 2019.
- [25] P. Shukl and B. Singh, "Recursive Digital Filter Based Control for Power Quality Improvement of Grid Tied Solar PV System," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 4, pp. 3412-3421, July-Aug. 2020.
- [26] L. Wang, C. Lam and M. Wong, "Analysis, Control, and Design of a Hybrid Grid-Connected Inverter for Renewable Energy Generation With Power Quality Conditioning," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 8, pp. 6755-6768, Aug. 2018.
- [۴] مهربخش دوگانه سجاد، باغرامیان آلفرد، محتوی پور سیدسعید. "یک ساختار جدید برای بهبود بازدهی اینورترهای متصل‌شده به شبکه فتوولتائیک بدون ترانسفورماتور". نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۵ (۳): ۱۱۲-۱۰۵، ۱۳۹۷.
- [5] A. A. Alkahtani et al., "Power Quality in Microgrids Including Supraharmonics: Issues, Standards, and Mitigations," in IEEE Access, vol. 8, pp. 127104-127122, 2020.
- [6] A. V. Sant, V. Khadkikar, W. Xiao, H. Zeineldin and A. Al-Hinai, "Adaptive control of grid connected photovoltaic inverter for maximum VA utilization," IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013, pp. 388-393.
- [7] G. S. Chawda et al., "Comprehensive Review on Detection and Classification of Power Quality Disturbances in Utility Grid With Renewable Energy Penetration," in IEEE Access, vol. 8, pp. 146807-146830, 2020.
- [8] C. Lam, L. Wang, S. Ho and M. Wong, "Adaptive Thyristor-Controlled LC-Hybrid Active Power Filter for Reactive Power and Current Harmonics Compensation With Switching Loss Reduction," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 10, pp. 7577-7590, Oct. 2017.
- [9] C. -S. Lam, M. -C. Wong, W. -H. Choi, X. -X. Cui, H. -M. Mei and J. -Z. Liu, "Design and Performance of an Adaptive Low-DC-Voltage-Controlled LC-Hybrid Active Power Filter With a Neutral Inductor in Three-Phase Four-Wire Power Systems," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 6, pp. 2635-2647, June 2014.
- [10] W. Choi, C. Lam, M. Wong and Y. Han, "Analysis of DC-Link Voltage Controls in Three-Phase Four-Wire Hybrid Active Power Filters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 5, pp. 2180-2191, May 2013.
- [11] L. Wang, C. Lam and M. Wong, "Unbalanced Control Strategy for A Thyristor-Controlled LC-Coupling Hybrid Active Power Filter in Three-Phase Three-Wire Systems," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 2, pp. 1056-1069, Feb. 2017.
- [12] S. Rahmani, A. Hamadi, K. Al-Haddad and L. A. Dessaint, "A Combination of Shunt Hybrid Power Filter and Thyristor-Controlled Reactor for Power Quality," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 5, pp. 2152-2164, May 2014.
- [۱۳] موحدی تبار علی، منفرد محمد، "طراحی کنترل‌کننده دو حلقه‌ای برای فیلتر فعال تک فاز موازی بدون سنسور با خروجی LCL با در نظر گرفتن تأخیر محاسبات و مدولاسیون"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۴ (۱): ۱۳۸-۱۲۷، ۱۳۹۶.
- [14] C. Lam, L. Wang, S. Ho and M. Wong, "Adaptive Thyristor-Controlled LC-Hybrid Active Power Filter for Reactive Power and Current Harmonics Compensation With Switching Loss Reduction," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 10, pp. 7577-7590, Oct. 2017.
- [۱۵] تودجی حمیدرضا، "ارتقای کیفیت توان و بهبود فرآیند کنترل کوره قوس الکتریکی با استفاده از UPQC"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۵ (۳): ۲۱-۱۳، ۱۳۹۷.