

بهبود کیفیت توان شبکه توزیع با بکارگیری جبران‌ساز استاتیک توزیع مبتنی بر سلول فتوولتائیک

مهدی صبری^۱، روشنک رضائی پور^{۲*}

^۱ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران، m.sabri@yrcet.ir
^۲ گروه مهندسی برق، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران، rezaeipour@iaut.ac.ir

چکیده

این مقاله یک مبدل منبع ولتاژ تغذیه شده با سیستم باتری به همراه مبدل بوست با سلول خورشیدی را به همراه یک ترانسفورماتور ستاره مثلث برای بهبود کیفیت توان بررسی می‌نماید. تئوری قاب مرجع سنکرون برای کنترل جبران‌ساز استاتیک توزیع (DSTATCOM) سه فاز چهار سیم پیشنهاد شده است که شامل مبدل منبع ولتاژی به همراه یک لینک DC خازنی است؛ که DSTATCOM پیشنهاد شده جبران‌سازی راکتیو، کاهش هارمونیک منبع و جبران‌سازی جریان نول را در نقطه اتصال مشترک PCC فراهم می‌آورد. سلول فتوولتائیک با مبدل بوست به همراه باتری برای تامین نیازهای لینک DC مبدل سه پایه منبع ولتاژ VSC استفاده شده است. مزیت اصلی این روش ارائه شده جبران‌سازی پیوسته در تمام طول شبانه روز است. همچنین ترانسفورماتور ستاره مثلث مسیری برای برقراری جریان مولفه صفر و هارمونیک‌های جریان نول ارائه نموده است. برای تعیین جریان مرجع به منظور تولید زوایای آتش VSC، سیستم کلی طراحی شده، توسعه داده شده است و در نرم-افزار متلب اعتبارسنجی شده است.

کلید واژه

شبکه توزیع، کیفیت توان، کنترل جبران‌ساز استاتیک توزیع، سلول فتوولتائیک

مقدمه

در سال‌های اخیر بدلیل استفاده گسترده از بارهای غیرخطی مبتنی بر الکترونیک قدرت، بسیاری از محققان بر روی بهبود کیفیت توان در شبکه‌های توزیع با استفاده از منابع تجدیدپذیر خورشیدی و بادی متمرکز شده‌اند [۱]. سلول‌های خورشیدی این قابلیت را دارند که به صورت سری متصل شده و ولتاژ DC لازم را تامین کنند؛ اما توان تولید شده از یک آرایه خورشیدی قبل از اتصال به لینک DC نیاز به اصلاح شرایط توان داشته (مانند DC به DC یا DC به AC) و بدین جهت اغلب مبدل DC به DC بوست برای افزایش ولتاژ سلول‌های خورشیدی به سطح ولتاژ مطلوب استفاده می‌شوند [۲-۴]. سیستم‌های توزیع سه فاز چهار سیم بدلیل توسعه برنامه ریزی نشده و استفاده از بارهای غیرخطی با مشکلات توان بسیاری روبرو هستند. این مشکلات کیفیت توان شامل جریان‌های هارمونیک، با توان راکتیو بالا، نامتعادلی بار و جریان نول زیاد و ... هستند [۵]. مشکلات کیفیت توان را می‌توان با استفاده از STATCOM اصلاح نمود. DSTATCOM توان راکتیو و اصلاح ولتاژ را در سطح انتقال انجام می‌دهد. اما برای شبکه‌های توزیع می‌توان از DSTATCOM استفاده نمود که سرعت پاسخ بالاتر و حجم

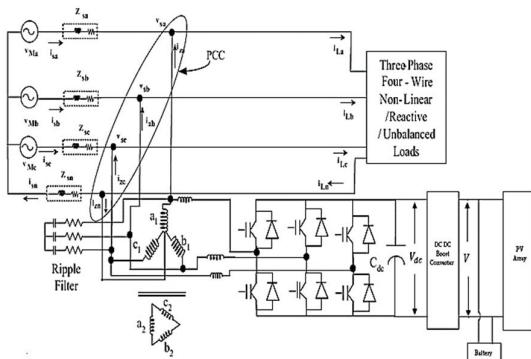
بهبود بیشتری دارد و بر مشکلات فوق نیز غلبه می‌نماید. توپولوژی‌های مختلفی از DSTATCOM برای جبران‌سازی توان راکتیو، کاهش هارمونیک جریان منبع، میرانسازی جریان نول و متعادل‌سازی بار تعریف شده‌اند که به ترتیب می‌توان به مبدل منبع ولتاژی چهارساق، سه VSC تکفاز، سه ساق با خازن‌های جداگانه [۶] و VSC سه ساق با ترمینال نول مثبت یا منفی از لینک DC اشاره نمود [۷]. همچنین از میان روش‌های مختلف کنترل اعمال شده به جبران‌سازهای سه فاز چهار سیم، روش قاب مرجع سنکرون برای کنترل DSTATCOM مناسب است [۸]. در مرجع [۹] دو روش متفاوت بهبود نامتعادلی ولتاژ بر اساس استفاده از DVR بصورت سری و DSTATCOM بصورت موازی برای بهبود نامتعادلی در فیدرهای توزیع مجهز به آرایه‌های خورشیدی ارائه شده است. در مرجع [۱۰] یک DSTATCOM سه فاز سه سیمه که مجهز به آرایه خورشیدی، باتری و مبدل بوست DC/DC برای بهبود کیفیت توان در سیستم توزیع معرفی شده است. در مرجع [۱۱] یک استراتژی کنترل دیجیتال بر اساس جبران‌سازی جریان هارمونیک اکتیو سه فاز برای بهبود کیفیت توان شبکه پیشنهاد شده است. در

که V_{DC} ولتاژ DC مرجع بوده و V_{DC} کمترین سطح ولتاژ شین DC است. بعلاوه α ضریب بارگذاری اضافه جریان و V ولتاژ فاز، I جریان فاز و t مدت زمانی است که باید ولتاژ شین DC بازگردانی شود. با در نظر گرفتن مقادیر نامی زیر مقدار خازن $2600 \mu F$ بدست آمده است که برای اطمینان بیشتر مقدار C_{DC} برابر با $3000 \mu F$ در نظر گرفته شده است.

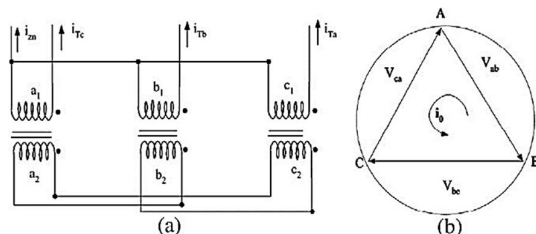
جدول ۱. مقادیر فرض شده برای محاسبه خازن لینک DC

V_{DC}	$680 (V)$
V	$415 / \sqrt{3} = 239.6 (V)$
t	$350 (\mu s)$
V_{DC1}	$670 (V)$
I	$58.13 (A)$
α	1.2

شکل ۲ الف و ب طریقه اتصال و دیگرام فازوری ترانسفورماتور ستاره مثلث را نشان داده است. ولتاژ اولیه ترانسفورماتور $240V$ انتخاب شده و نسبت تبدیل ثانویه به اولیه نیز ۱:۱ در نظر گرفته شده است. همچنین فیلتر ریپل استفاده شده در سمت اولیه برای کاهش ریپل ولتاژ ناشی از کلیدزنی جریان VSC در نقطه مشترک اتصال PCC است [۱۵].



شکل ۱. دیگرام جبران‌ساز پیشنهاد شده مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر با ترانسفورمر ستاره مثلث [۱۵]



شکل ۲. الف- سیم پیچی های ترانسفورمر ستاره مثلث ب- دیگرام فازوری [۱۵]

مرجع [۱۲]، الگوریتم کنترلی برای DSTATCOM با هدف بهبود کیفیت توان سیستم توزیع برای حذف هارمونیک ها، متعادل سازی بار و جبران‌سازی توان راکتیو استفاده شده است. در [۱۳] از الگوریتم کنترلی ترکیبی DSTATCOM برای بهبود کیفیت توان سیستم توزیع استفاده شده است.

هدف اصلی این مقاله حفظ ولتاژ لینک DC منبع ولتاژ سه ساق برای فراهم نمودن جبران‌سازی پیوسته است. همچنین هدف استفاده از آرایه‌های فتوولتاییک نیز تغذیه مبدل بوست برای افزایش ولتاژ و حفظ ولتاژ لینک DC است. هنگامی که جبران‌سازی پیوسته مورد نیاز است، در طول روز آرایه PV به مبدل بوست متصل بوده و در طی شب باتری به عنوان منبع DC برای مبدل بوست کار می‌کند. مبدل بوست ارائه شده در این مقاله از روش مدولاسیون پهنای باند استفاده نموده و با استفاده از این روش، مبدل بوست از منبع توان ثابتی را کشیده و در این مقاله الگوریتم حداکثرسازی توان انتقالی مدنظر نبوده است. مبدل VSC نیز از کلیدهای IGBT به همراه خازن شین DC برای جبران‌سازی استفاده نموده است.

طراحی استاتکام توزیعی و ترانسفورماتور ستاره مثلث

در شکل ۱ مدل مدار VSC سه ساق تغذیه شده با مبدل بوست به همراه ترانسفورماتور به نقطه اتصال مشترک (PCC) به همراه بار غیرخطی نشان داده شده است. مدل VSC از IGBT ها و خازن‌های لینک DC به همراه سلف‌ها تشکیل شده است. مقدار ولتاژ شین DC مربوط به استاتکام توزیعی مبتنی بر VSC اساساً به انرژی لحظه‌ای در دسترس استاتکام توزیعی وابسته است، ولتاژ شین DC بصورت زیر محاسبه می‌گردد [۱۴]:

$$V_{dc} = \frac{2\sqrt{3}V_{LL}}{\sqrt{3}m} \quad (1)$$

که در رابطه ۱ مقدار m برابر با یک و شاخص مدولاسیون و V_{LL} ولتاژ موثر خط به خط است. اگر ولتاژ فاز به فاز موثر 415 ولت در نظر گرفته شود، آنگاه ولتاژ DC شین برابر با $677/69$ ولت محاسبه می‌گردد که 680 ولت لحاظ می‌شود. همچنین اندازه خازن DC (C_{DC}) مبدل VSC به انرژی لحظه‌ای در دسترس DSTATCOM در طی حالت گذار وابسته بوده و مقدار این خازن از رابطه ۲ بدست می‌آید [۱۴]:

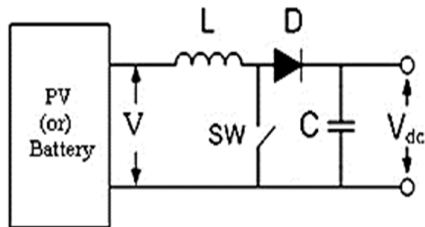
$$\frac{1}{2} C_{dc} [V_{dc}^* - V_{dc1}^*] = 3V(\alpha I)t \quad (2)$$

بوده و تنها باتری‌ها به تغذیه مبدل بوست برای جبران‌سازی متصل هستند.

کنترل ولتاژ لینک DC با مبدل بوست

از مبدل بوست برای افزایش سطح ولتاژ برای دستیابی به ولتاژ مطلوب بهره‌گیری شده و عملکرد این مبدل با آرایه PV یا باتری‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. عملکرد مدار به دو حالت تقسیم‌بندی می‌گردد. در حالت اول زمانی که کلید بسته باشد جریان منبع سلف مبدل بوست را برای زمان Ton شارژ می‌نماید. بطور مشابه هنگامیکه کلید باز می‌گردد، جریان سلف از طریق دیود جاری شده و بار را برای مدت Toff تغذیه می‌نماید. ولتاژ ۳۶ ولت باتری یا آرایه PV تغذیه مبدل بوست را برای حفظ ولتاژ لینک DC در مقدار ثابت (V) ۶۷۶ را بر عهده داشته و بدین منظور فرکانس کلیدزنی مبدل بوست ۲۵ کیلوهرتز و مقدار سلف نیز ۰/۰۱۹۱ میلی‌هنری محاسبه شده است [۱۶]. خازن ۳۰۰۰ میکروفاراد محاسبه شده از رابطه ۲ ولتاژ Vout را به مبدل DSTATCOM تحویل می‌دهد. رابطه بین ولتاژ ورودی و ولتاژ خروجی مبدل بوست در رابطه ۶ بیان شده است که ۷ ولتاژ باتری یا آرایه خورشیدی است [۱۶].

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \rightarrow \begin{cases} V_{out} = V_{dc}, V_{in} = V \\ D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \end{cases} \quad (1)$$



شکل ۴. ساختار مبدل بوست تغذیه شده از PV با باتری [۱۵]

کنترل جبران‌ساز استاتیک توزیع

تاکنون الگوریتم‌های مختلفی برای کنترل DSTATCOM ارائه شده‌اند که در این مقاله روش قاب مرجع سنکرون dqo انتخاب شده است [۱۷]. نمایش بلوکی این روش کنترل در شکل ۵ ترسیم شده است. در این روش کنترل از جریان‌های بار، ولتاژ نقطه اتصال مشترک PCC و ولتاژ لینک DC برای سیگنال‌های فیدبک استفاده شده است. با استفاده از (V) ولتاژ یا جریان‌ها از

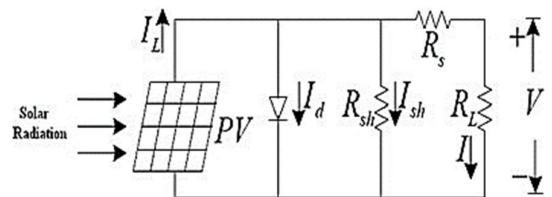
مدلسازی آرایه فتوولتائیک

آرایه PV یک دسته از ماژول‌های فتوولتائیک مختلف متصل شده بصورت سری است که ولتاژ و جریان مطلوب را تولید می‌کنند. تئوری سلول فتوولتائیک مبتنی بر اثر تابش بر مواد نیمه‌رسانا است. مدار معادل الکتریکی سلول خورشیدی در شکل ۳ نشان داده شده است. منحنی میزان تابش خورشید و هم‌چنین دمای سلول خورشیدی از مرجع [۱۵] استخراج شده است. آرایه‌های خورشیدی برای دستیابی به مشخصه V-I مطلوب بصورت سری-موازی بهم متصل شده‌اند.

هم‌چنین سلول خورشیدی نیز از معادلات پایه سلول خورشیدی با در نظر گرفتن اثر دما و تابش خورشید مدلسازی شده است. معادلات جریان دیود و جریان بار با روابط زیر بیان می‌گردند [۱۰]:

$$I_d = I_{sat} (e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} - 1) \quad (3)$$

$$I = I_L - I_{sat} (e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} - 1) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (4)$$



شکل ۳. مدار معادل سلول خورشیدی [۱۵]

بیشینه ولتاژ فتوولتائیک در شرایط مدار باز (I=0) تولید می‌گردد که به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$V_{oc} = \frac{AkT}{Q} \ln\left(\frac{I_L}{I_{sat}} + 1\right) \quad (5)$$

کارکرد DSTATCOM به سه حالت مختلف تقسیم شده است که این حالت‌های کارکرد عبارتند از: الف- حالت کارکرد در روز با توان بالا: در این حالت ولتاژ خروجی PV مبدل بوست را تغذیه نموده و جبران‌سازی منبع هم‌زمان با شارژ باتری‌های ذخیره‌سازی صورت می‌پذیرد. ب- حالت عملکرد روزانه: هنگامیکه جبران‌سازی پیوسته مورد نظر باشد، اگر ولتاژ خروجی PV با ولتاژ مورد نیاز برای مبدل بوست برابر باشد، ماژول PV مستقیم به مبدل متصل شده تا پس از افزایش سطح ولتاژ جبران‌سازی صورت پذیرد. در این حالت باتری‌ها شارژ نمی‌شوند. ج- حالت عملکرد شبانه: در این حالت خروجی ماژول PV صفر

DSTATCOM استفاده می‌شده‌اند. یک کنترل‌کننده جریان مدولاسیون پهنای باند (PWM) برای تعیین زوایای آتش IGBTها استفاده شده است.

شبیه‌سازی و نتایج

مقادیر داده‌های سیستم قدرت مورد مطالعه در [۱۵] آورده شده است و پارامترهای سیستم فتوولتاییک نیز در جدول ۲ بیان شده‌اند. در جدول ۳ نیز مقادیر مختلف اعوجاج هارمونیکی جریان منبع (THD) برای قبل از جبران‌سازی و پس از آن نشان داده شده‌اند.

جبران‌ساز DSTATCOM مبتنی بر VSC سه ساق تغذیه شده با سلول‌های خورشیدی به همراه شبکه نمونه در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب مدلسازی و شبیه‌سازی شده است. در شکل ۶-الف ولتاژ منبع سه فاز به همراه جریان‌های منبع بدون جبران‌سازی رسم شده است. هم‌چنین در شکل ۶-ب جریان فاز A منبع به همراه طیف فرکانسی و هارمونیکی آن ترسیم شده است. در لحظه $t=0/0.5$ ثانیه هر سه بار وارد شده‌اند. با اعمال سیستم کنترل در این زمان شکل موج کاملاً سینوسی و اصلاح شده است.

همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌گردد با تغییرات بار در لحظات مختلف، با جبران‌سازی DSTATCOM جریان منبع سینوسی بوده و حتی با خروج بار روی فاز A نیز منبع این تغییر را حس نکرده است. در شکل ۸ نیز جریان فاز A منبع به همراه طیف هارمونیکی آن با اعمال روش کنترل و پس از میرانسازی رسم شده است. جریان سیم نول (برگشت) در بازه [۰-۰/۵۵] نیز در شکل ۹ رسم شده است و همانگونه که مشاهده می‌گردد، با جبران‌سازی DSTATCOM این جریان تقریباً صفر است. هم‌چنین در شکل ۱۰ نیز ولتاژ لینک DC در بازه [۰-۰/۵۵] مشاهده می‌گردد که با کنترل‌کننده PI این ولتاژ به نحو مطلوبی ثابت نگه داشته شده است.

با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ دیده می‌شود که در حالت بدون جبران‌سازی در لحظه $t=0/0.5$ ثانیه هر سه بار وارد شده‌اند. با اعمال سیستم کنترل در این زمان شکل موج کاملاً سینوسی و اصلاح شده است و سیستم در حالت متعادل قرار گرفته است و این نشان‌دهنده عملکرد مناسب جبران‌سازی پیشنهادی می‌باشد. بعلاوه، شاخص THD پس از جبران‌سازی پیشنهادی، کاهش قابل توجهی داشته است و بنابراین کارایی روش ارائه‌شده اثبات می‌گردد.

مرجع سه فاز abc به مرجع قاب گردان سنکرون dqo تبدیل شده‌اند [۱۰].

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} \quad (7)$$

بعلاوه از یک PLL نیز برای همزمان‌سازی این سیگنال‌ها با ولتاژ PCC استفاده شده و برای محاسبه مولفه‌های DC جریان-های i_d و i_q از فیلتر پایین‌گذر عبور داده شده‌اند. اولین کنترل‌کننده PI از خطای بین ولتاژ مرجع لینک DC و مقدار ولتاژ واقعی تغذیه شده است تا خروجی این کنترل‌کننده مولفه تلفات جریان باشد که با i_{loss} نشان داده شده است [۱۵].

$$i_{loss(n)} = i_{loss(n)} + K_{pq}(V_{de(n)} - V_{de(n-1)}) + K_{id}V_{de(n)} \quad (8)$$

$V_{de(n)}$ میزان خطای ولتاژ شین DC بوده و برای نمونه m بیان شده است. K_{id} و K_{pd} ضرایب تناسبی و انتگرالی کنترل‌کننده PI ولتاژ لینک DC بوده و لذا جریان مرجع برای منبع برابر است با [۱۵]:

$$i_d^* = i_{dce} + i_{loss} \quad (9)$$

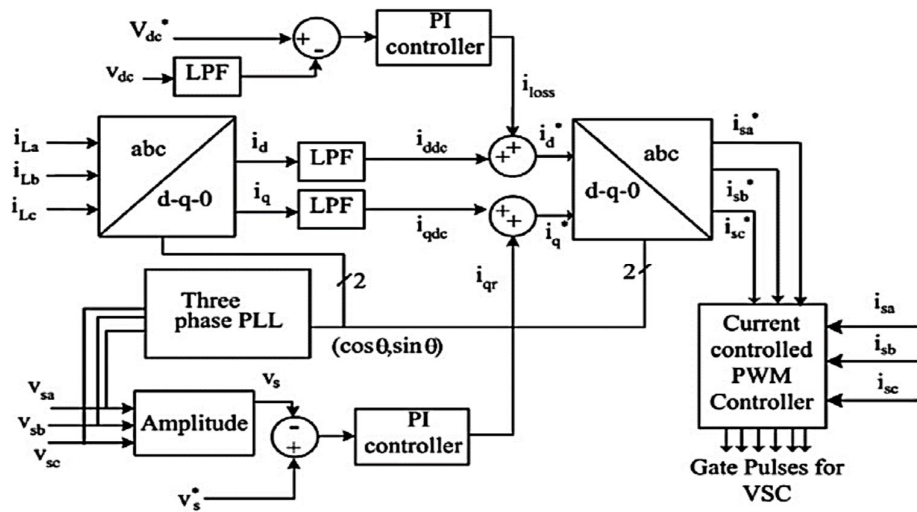
بطور مشابه، اندازه ولتاژ PCC و مقدار مرجع آن نیز به کنترل‌کننده PI دیگری داده شده است تا این ولتاژ را تنظیم نماید. خروجی این کنترل‌کننده به مولفه DC از جریان i_q افزوده شده است [۱۵].

$$i_{qr(n)} = i_{qr(n-1)} + K_{pq}(V_{te(n)} - V_{te(n-1)}) + K_{iq}V_{te(n)} \quad (10)$$

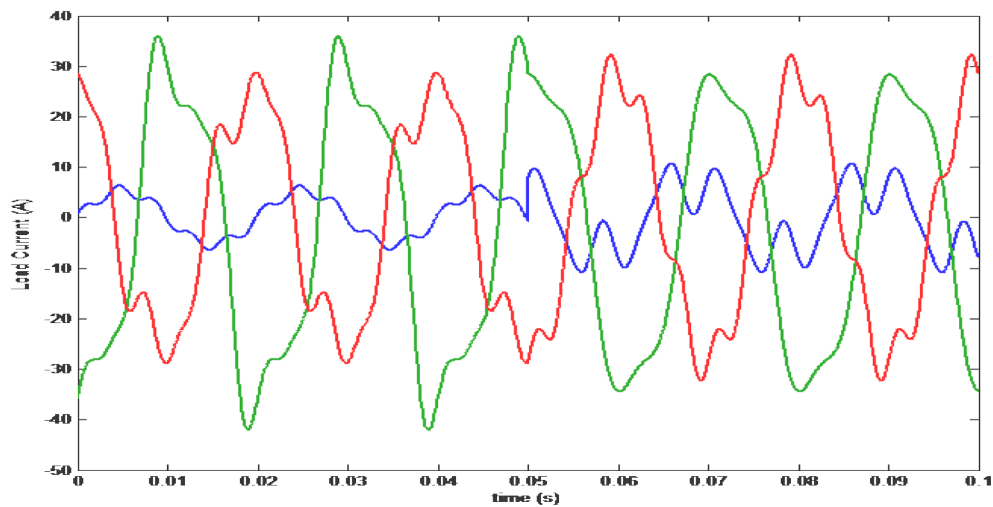
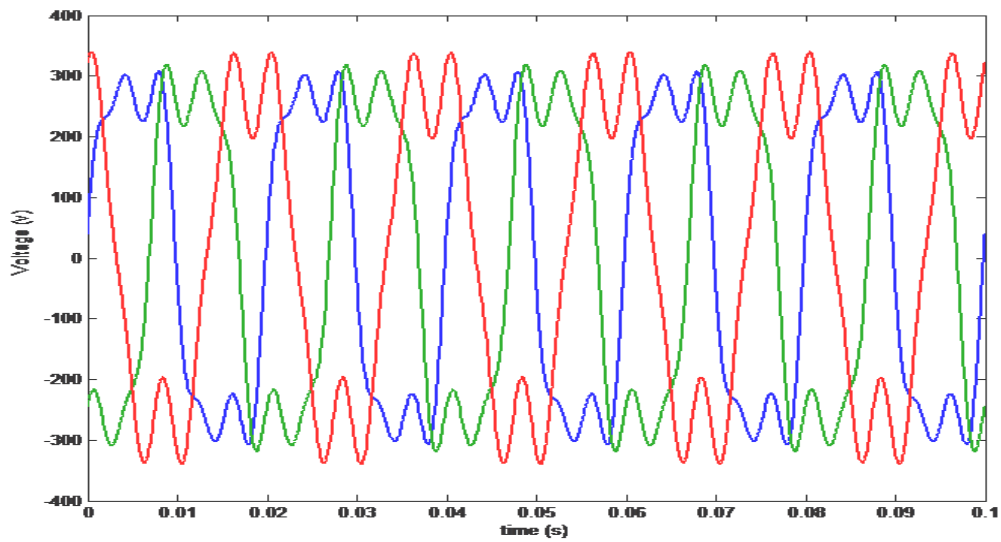
که $V_{de(n)}$ خطای ولتاژ شین PCC بوده و نشان‌دهنده نمونه برداشته شده در زمان نمونه برداری m است. بطور مشابه ضرایب تناسبی و انتگرالی کنترل‌کننده PI ولتاژ PCC نیز به ترتیب K_{iq} و K_{pq} هستند. جریان مرجع منبع در راستای محور q برابر است با [۱۵]:

$$i_q^* = i_{qdc} + i_{qr} \quad (11)$$

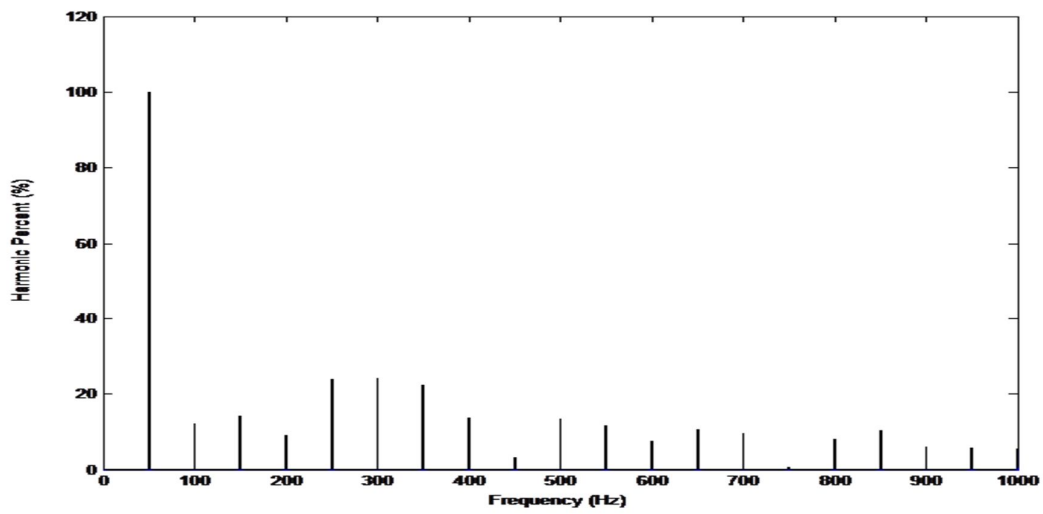
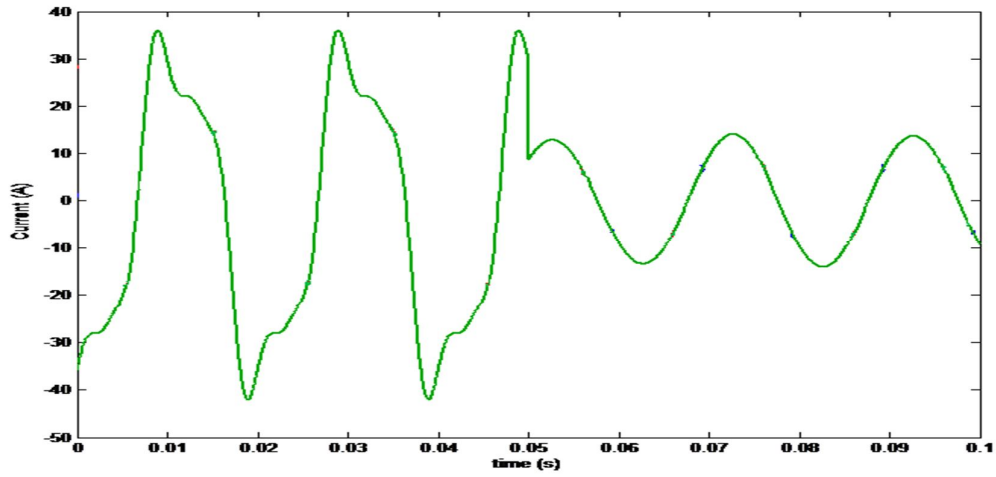
سپس با استفاده از عکس تبدیل پارک، جریان‌های dqo دوباره به مرجع abc بازگشت داده شده و جریان‌های مرجع برای هر سه فاز (i_{sa}^* , i_{sb}^* , i_{sc}^*) برای کلیدزنی VSC سه ساق



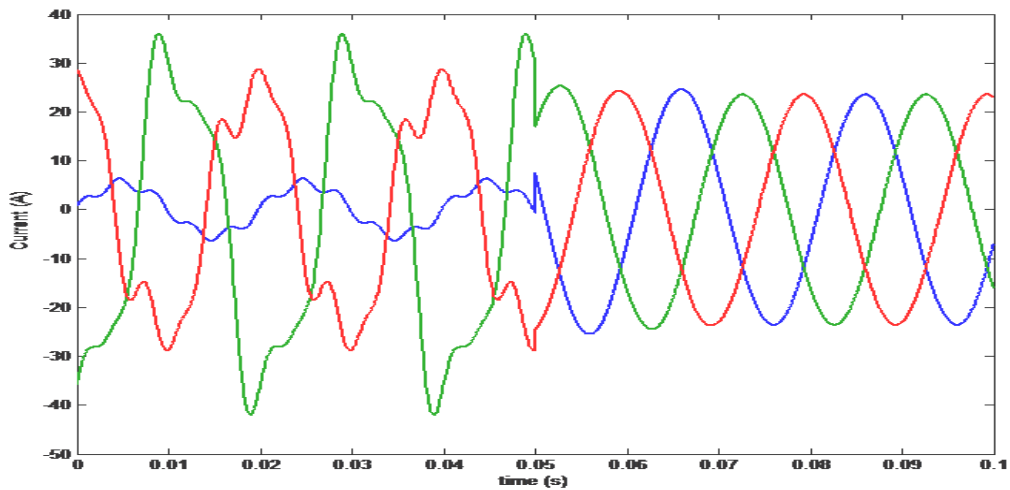
شكل ٥. الگوریتم کنترل VSC [١٥]



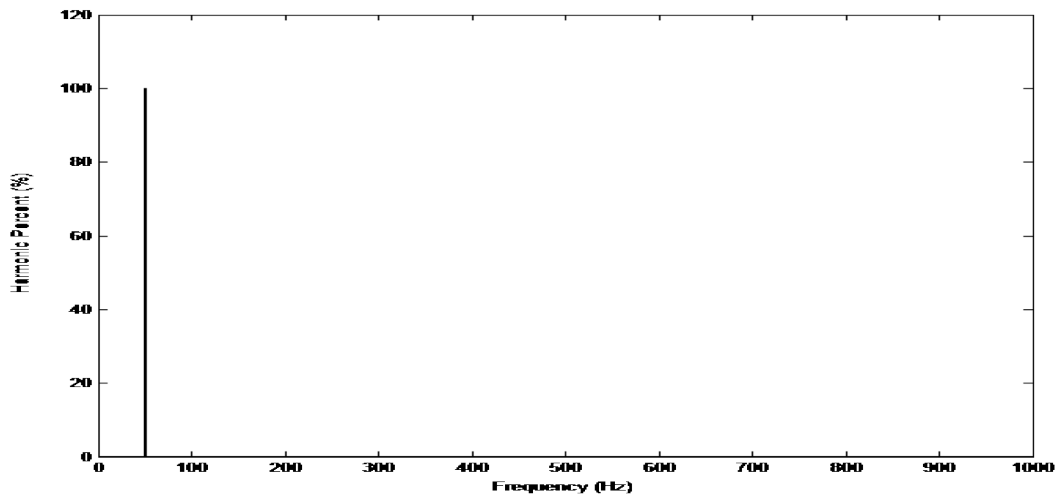
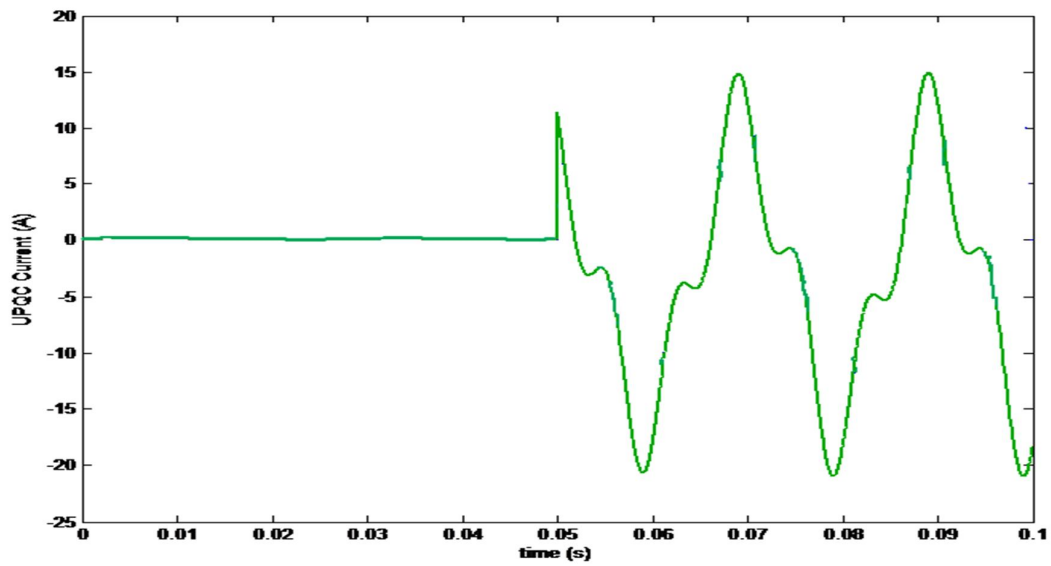
شكل ٦ الف. ولتاژ منبع سه فاز و جریان منبع سه فاز بدون جبران سازی



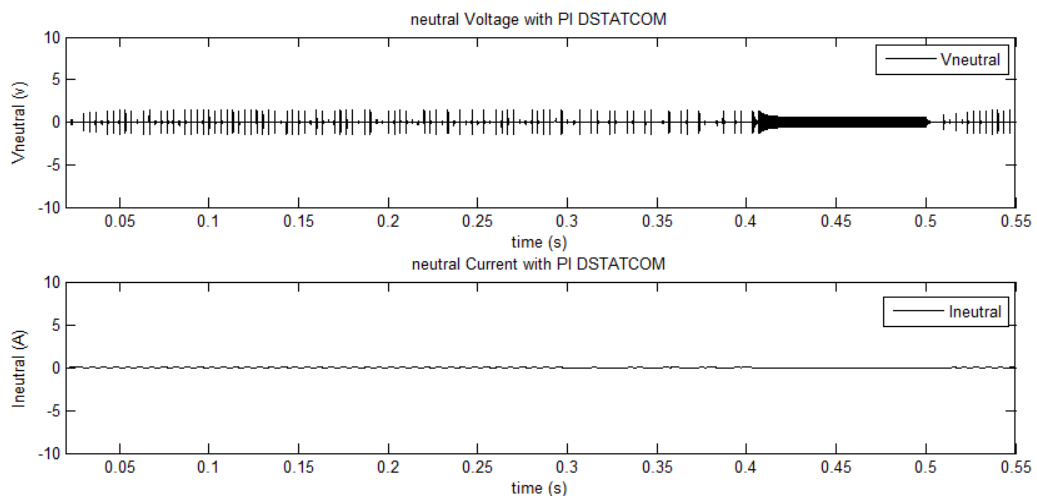
شکل ۶. ب. جریان فاز A منبع به همراه طیف فرکانسی



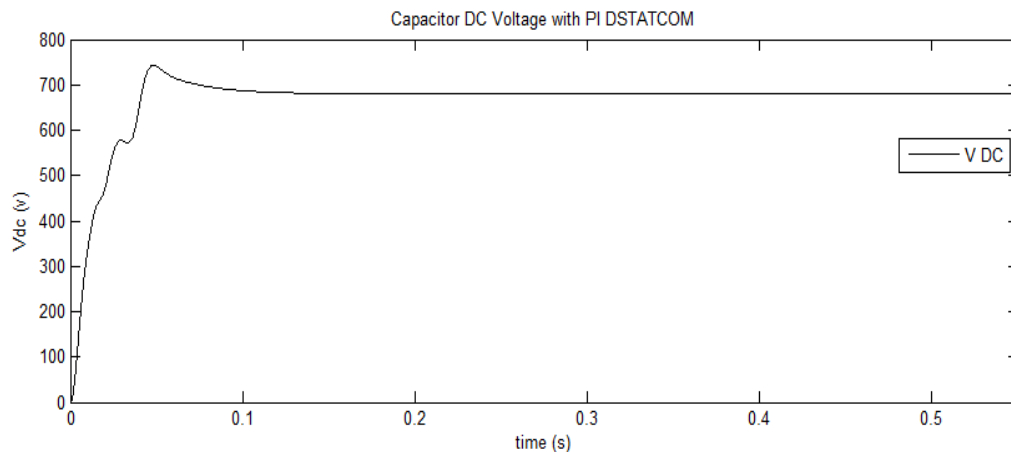
شکل ۷. جریان منبع قبل و پس از جبران‌سازی



شکل ۸. جریان فاز A منبع به همراه طیف هارمونیک آن با اعمال روش کنترل و پس از میراسازی



شکل ۹. ولتاژ و جریان سیم نول (برگشت) پس از میراسازی در بازه [۰-۰/۵۵]



شکل ۱۰. ولتاژ لینک DC در بازه [۰-۰/۵۵]

جدول ۲: پارامترهای سیستم فتوولتاییک [۱۵]

۲۴۰	حداکثر توان نامی	۳۵/۵	جریان نامی
۷/۳۷ و ۴۳/۶	ولتاژ مدار باز و ولتاژ نامی	۶/۷۷	ضریب حرارتی جریان اتصال کوتاه
۷/۳۷	جریان اتصال کوتاه	۲/۲۱	ضریب حرارتی مدار باز

جدول ۳: مقادیر مختلف اعوجاج هارمونیکی جریان منبع (THD) برای قبل و پس از جبران‌سازی

	قبل از جبران‌سازی	پس از جبران‌سازی
مقدار THD جریان فاز A	۳۸/۸۴ %	۷/۵۱ %
مقدار THD جریان فاز B	۳۶/۷۷ %	۷/۸۴ %
مقدار THD جریان فاز C	۳۵/۵۱ %	۷/۵۹ %

Delivery, IEEE Transactions on, vol. 26, pp. 307-315, 2011.

- [2] Y. Yang, P. Enjeti, F. Blaabjerg, & H. Wang, "Wide-scale adoption of photovoltaic energy: Grid code modifications are explored in the distribution grid," IEEE Industry Applications Magazine, vol. 21, no. 5, pp. 21-31, 2015.
- [3] X. Lu, J.M. Guerrero, K. Sun, and J.C. Vasquez, "An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 4, pp. 1800-1812, 2014.
- [4] B. Renders, K. De Gussemé, W. R. Ryckaert, K. Stockman, L. Vandevelde, and M. H. Bollen, "Distributed generation for mitigating voltage dips in low-voltage distribution grids," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 23, pp. 1581-1588, 2008.
- [5] S. Govindarajan, and S. S. Balakrishnan, "Analysis and interpretation of Power Quality issues with suitable corrective measures," In Green Computing, Communication and

نتیجه گیری

کارایی سیستم سه فاز چهارسیم به همراه جبران‌ساز DSTATCOM مبتنی بر VSC سه ساق تغذیه شده با سلول خورشیدی به همراه ترانسفورماتور ستاره مثلث در نرم‌افزار متلب بررسی شده است. روش قاب مرجع گردان سنکرون برای جبران‌سازی توان راکتیو، کاهش هارمونیکی جریان و جبران‌سازی جریان سیم نول استفاده شده و از یک میدل بوست برای افزایش سطح ولتاژ آرایه خورشیدی یا باتری بهره برده شده است. با بررسی نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است که میزان THD جریان منبع برای تمامی فازها پس از جبران‌سازی بطور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است.

مراجع

- [1] M. Singh, V. Khadkikar, A. Chandra, and R. K. Varma, "Grid interconnection of renewable energy sources at the distribution level with power-quality improvement features," Power

- [17] S. Bouafia, A. Benaissa, S. Barkat, and M. Bouzidi, "Second order sliding mode control of three-level four-leg DSTATCOM based on instantaneous symmetrical components theory," *Energy Systems*, pp.1-33, 2016.
- Conservation of Energy (ICGCE), International Conference on IEEE, pp. 479-484, 2013.
- [6] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, "Instantaneous power theory and applications to power conditioning," *John Wiley & Sons*, vol. 31, 2007.
- [7] H.-L. Jou, K.-D. Wu, J.-C. Wu, C.-H. Li, and M.-S. Huang, "Novel power converter topology for three-phase four-wire hybrid power filter," *Power Electronics, IET*, vol. 1, pp. 164-173, 2008.
- [8] L. B. G. Campanhol, S. A. O. da Silva, & A. Goedtel, "Application of shunt active power filter for harmonic reduction and reactive power compensation in three-phase four-wire systems," *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 11, pp. 2825-2836, 2014.
- [9] Farhad Shahnian, "Voltage unbalance improvement in low voltage residential feeders with rooftop PVs using custom power devices," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 55, pp. 362-377, 2014.
- [10] V. Kamatchi Kannan, N. Rengarajan, "Investigating the performance of photovoltaic based DSTATCOM using $I \cos \phi$ algorithm," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 54 pp. 376-386, 2014.
- [11] P. Karuppanan, Kamala Kanta Mahapatra, "Active harmonic current compensation to enhance power quality," *Electrical Power and Energy Systems*, vol 62, pp. 144-151, 2014.
- [12] Singh, B., Dube, S. K., & Arya, S. R. "An improved control algorithm of DSTATCOM for power quality improvement," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 493-504, 2015.
- [13] M. Srinivas, I. Hussain, & B. Singh, "Combined LMS-LMF-based control algorithm of DSTATCOM for power quality enhancement in distribution system," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 7, pp. 4160-4168, 2016.
- [14] R. Manikanta, & S. N. V. S. K. Chaitanya, "A Fuzzy Logic Based D-STATCOM Topology with Reduced VSI Rating, DC Link Voltage and Filter Size," *International Electrical Engineering Journal (IEEJ)*, vol. 5, no. 10, pp. 1586-1593, 2014.
- [15] V. K. Kannan and N. Rengarajan, "Photovoltaic based distribution static compensator for power quality improvement," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 42, pp. 685-692, 2012.
- [16] E. Atawi Ibrahim, and M. Kassem Ahmed, "Optimal Control Based on Maximum Power Point Tracking (MPPT) of an Autonomous Hybrid Photovoltaic/Storage System in Micro Grid Applications." *Energies* 10, no. 5. p. 643, 2017.

