

طراحی یک فیلتر فعال ترکیبی متصل به پنل‌های خورشیدی مبتنی بر ایده جداسازی فرکانسی جریان بار در شبکه توزیع

محمد سلمانی کویخی^۱ و علی زعفری^{۲*}

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>در این مقاله، فیلتر فعال ترکیبی جدید متصل به پنل‌های خورشیدی به منظور کنترل هم‌زمان توان اکتیو و راکتیو با هدف بهبود کیفیت توان پیشنهاد می‌شود. این فیلتر ترکیبی شامل یک فیلتر فعال مبتنی بر مبدل منبع جریان (CSC) و فیلتر پسیو (LC) کنترل شده با تایریستور است که براساس ایده جداسازی مؤلفه‌های فرکانس بالا و پایین جریان بار می‌تواند معایب هر دو نوع فیلتر را تعدیل کند. مؤلفه‌های فرکانس پایین جریان بار به فیلتر فعال و مؤلفه‌های فرکانس بالا به فیلتر پسیو کنترل پذیر با تایریستور (TCLC) اعمال می‌شود. در این طرح علاوه بر کاهش هارمونیک‌های جریان شبکه توزیع و بهبود ضریب توان، فیلتر ترکیبی می‌تواند توان اکتیو پنل‌های خورشیدی متصل به CSC را در هر لحظه بدون اغتشاش گذرا در لحظات تغییر نقطه کار به شبکه توزیع انتقال دهد. عملکرد ساختار پیشنهادی در یک سیستم توزیع در نقطه کارهای مختلف با استفاده از نرم‌افزارهای PSCAD و MATLAB مطالعه شده است.</p>	<p>دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۱۷ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶</p> <p>واژگان کلیدی: سیستم فتوولتائیک (PV)، پنل خورشیدی، جداسازی مؤلفه‌های فرکانسی، فیلتر فعال ترکیبی (HAPF)، مبدل منبع جریان (CSC).</p>

۱-مقدمه

هزینه بالای فیلتر اکتیو و همچنین مشکلات ناشی از حضور فیلتر پسیو، ساختارهای ترکیبی معرفی شدند [۱۳ و ۱۴]. فیلترهای ترکیبی، ابتدا قادر بودند فقط محدوده کوچکی از هارمونیک و توان راکتیو را جبران‌سازی کنند؛ اما با ادامه مطالعات روی فیلتر ترکیبی، به‌ویژه در سال‌های اخیر، طرح‌های جدیدی از فیلتر ترکیبی معرفی شده که توانسته قسمت بزرگی از این مشکلات را برطرف کند. نفوذ رو به رشد انرژی‌های تجدیدپذیر، مانند انرژی خورشیدی در شبکه قدرت، باعث توجه بیش از پیش محققان حوزه کیفیت توان به این موضوع شده است. انتقال توان خورشیدی از طریق مبدل DC/AC از جمله تحقیقات در سال‌های اخیر است [۱۵-۲۶]. در این تحقیقات ثابت شده است براساس استراتژی کنترل، مبدل می‌تواند علاوه بر جبران‌سازی هارمونیک و توان

امروزه مشکلاتی مثل ضریب قدرت کم، اغتشاشات هارمونیک و نامتعادلی جریان و ولتاژ در بحث کیفیت توان مورد توجه هستند [۱ و ۲]. به‌منظور جبران توان راکتیو و کاهش هارمونیک، فیلترهای پسیو و جبران‌کننده‌های استاتیکی توان راکتیو (SVC^۲) به دلیل هزینه پایین و ساختار ساده، به ترتیب در سال ۱۹۴۰ و ۱۹۶۰ وارد صنعت برق شدند [۳-۵]. در هر دو نوع جبران‌کننده، مشکلات رزونانسی به دلیل تغییر پارامترهای شبکه به‌واسطه تغییر فرکانس وجود دارد [۶ و ۷]. برای حل این مشکل، فیلترهای اکتیو قدرت (APF^۳) در سال ۱۹۷۶ پیشنهاد شدند [۸] و [۹]. در سطوح ولتاژ متوسط باید از مبدل‌های چندسطحی توان بالا استفاده شود که این موضوع، هزینه و تلفات این فیلترها را افزایش می‌دهد [۱۰ و ۱۱]. به دلیل تلفات و

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Azafari@iauneka.ac.ir

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان،

ایران

۲. گروه مهندسی برق، واحد نکا، دانشگاه آزاد اسلامی، نکا، ایران

² Static Var Compensator

³ Active Power Filter

خودحفاظتی دارد [۲۸]. استفاده از ایده جداسازی فرکانسی، فشار و استرس بر نیمه‌های استفاده‌شده در هر بخش فیلتر ترکیبی را کمتر کرده، به دنبال آن، تلفات کلیدزنی نیز کاهش می‌یابد.

ایده اصلی در مقاله حاضر، اتصال پنل‌های خورشیدی به شبکه اصلی و بار محلی از طریق ساختار ترکیبی معرفی شده در [۲۵ و ۲۷] به‌عنوان اینترفیس مطرح است و این مجموعه از دید یک تولید پراننده در زمینه تبادل توان اکتیو و راکتیو و تقسیم توان (Power Sharing) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین ایده جداسازی مؤلفه‌های فرکانسی جریان بار، معرفی شده در [۲۷] با رویکرد به کارگیری انرژی‌های نو در سیستم‌های تولیدپراننده مورد بررسی قرار گرفته، تکمیل تر می‌شود.

در ساختار پیشنهادی، چهار هدف زیر مفروض است:

- بهبود ضریب توان
- کاهش اعوجاج هارمونیک کل به‌ازای زوایای آتش مختلف بار (یکسوکننده تایریستوری با بار (RL

- کنترل هم‌زمان توان اکتیو و توان راکتیو
- کاهش ظرفیت مبدل^۳ CSC

در ادامه و در بخش دوم، ساختار سیستم مورد مطالعه شامل شبکه تغذیه سه فاز، بار غیرخطی و جبران‌کننده معرفی می‌شود. در بخش سوم، استراتژی کنترل TCLC-HAPF ارائه شده است. نتایج حاصل از مطالعات شبیه‌سازی در بخش چهارم مورد بررسی قرار گرفته، نهایتاً در بخش پنجم، نتیجه‌گیری مقاله ارائه خواهد شد.

۲- سیستم مورد مطالعه

در شکل (۱) سیستم مورد مطالعه نشان داده شده است. در این شکل، فیلتر پیشنهادی به شبکه توزیع ۴۰۰ ولت متصل شده است. در این ساختار، پنل‌های خورشیدی در سمت DC فیلتر اکتیو مبتنی بر مبدل منبع جریان متصل شده است. پارامترهای شبکه پیشنهادی در جدول ۱ آورده شده است. دو بخش TCLC و فیلتر فعال مبتنی بر مبدل منبع جریان براساس ایده جداسازی فرکانس‌های هارمونیک جریان بار می‌توانند هارمونیک و توان راکتیو بار را جبران و همچنین توان اکتیو حاصل از پنل‌های خورشیدی متصل به سمت DC مبدل منبع جریان را به شبکه تزریق کنند.

راکتیو، توان اکتیو کنترل‌شده حاصل از حضور پنل‌های خورشیدی را نیز از طریق مبدل به شبکه تزریق کند.

در مراجع [۱۵ و ۱۶] از مبدل‌های چندسطحی به‌عنوان فیلتر اکتیو استفاده شده است که سلول‌های خورشیدی در سمت DC متصل هستند. این مبدل‌ها از طریق یک سلف به شبکه متصل می‌شوند. این طرح به‌اختصار IGCT^۱ گفته می‌شود. با توجه به اینکه این طرح مبتنی بر مبدل‌های چندسطحی است، تعداد نیمه‌های قدرت و خازن‌های سمت DC افزایش یافته، به دنبال آن، هزینه و پیچیدگی کنترل مبدل نیز افزایش می‌یابد. در ساختار معرفی شده در مراجع [۱۷ و ۱۸] از یک ترانسفورماتور برای تطبیق ولتاژ بین شبکه و مبدل چند سطحی استفاده شده است. در این طرح به‌دلیل استفاده از ترانسفورماتور، ابعاد، وزن، تلفات و هزینه فیلتر افزایش می‌یابد. در طرح‌های معرفی شده در مراجع [۱۹ و ۲۰] از یک مبدل DC/DC افزاینده برای افزایش ولتاژ پنل‌های خورشیدی استفاده شده است. در این طرح به‌دلیل استفاده از مبدل افزاینده، نه تنها پیچیدگی کنترل مبدل مخصوصاً در سمت DC افزایش یافته، بلکه سطح اعوجاج هارمونیک کل در شبکه بیشتر می‌شود. مراجع [۲۱-۲۴] ساختاری از فیلترهای مبتنی بر پنل‌های خورشیدی را معرفی می‌کنند که با حذف مبدل افزاینده و ترانسفورماتور، پیچیدگی و هزینه کنترل، هزینه و اندازه مبدل کاهش داده می‌شود.

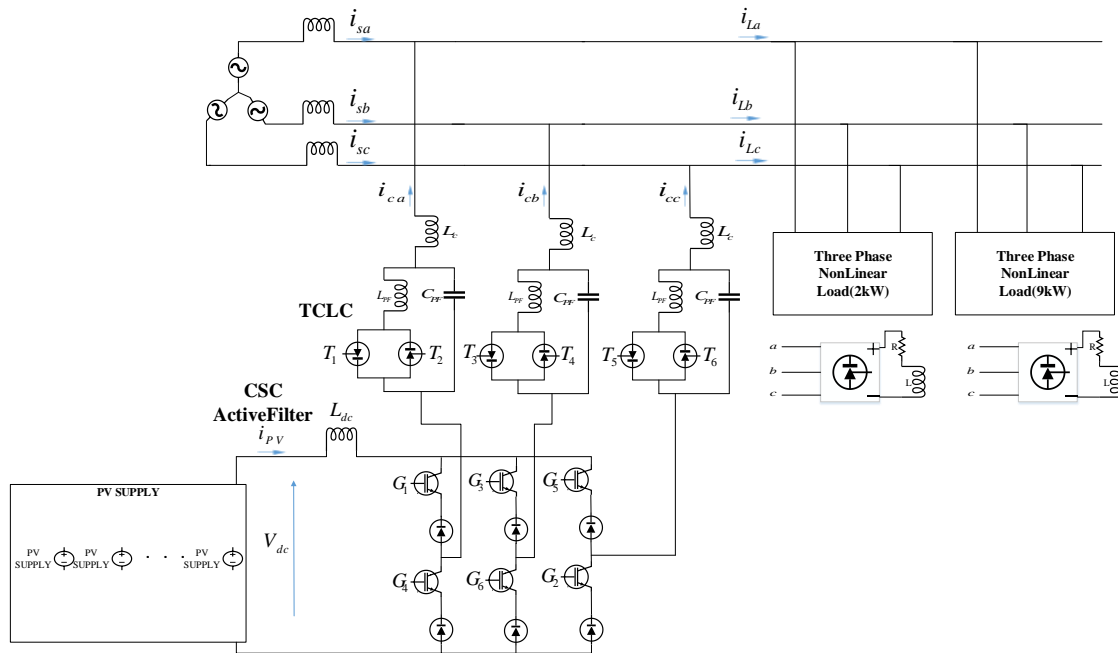
در [۲۵] طرحی جدید از فیلتر ترکیبی شامل فیلتر فعال سری شده با فیلتر پسیو قابل کنترل با تایریستور (TCLC-HAPF^۲) معرفی شده است. این طرح در محدوده وسیعی قادر است توان راکتیو را جبران‌سازی کند و همچنین با قابلیت کنترل‌پذیری مطلوب می‌تواند بر عملکرد فیلتر ترکیبی تأثیرگذار باشد که از جمله می‌توان به تلفات و ظرفیت فیلتر فعال، محدوده مبدل و قابلیت جلوگیری از وقوع رزونانس اشاره کرد.

در این ساختار پیشنهادی، یک فیلتر فعال مبتنی بر مبدل منبع جریان و یک فیلتر پسیو کنترل‌پذیر با تایریستور استفاده شده است. در این طرح برای محدودسازی و کنترل جریان dc ورودی به مبدل از مبدل منبع جریان استفاده شده است [۲۷]. همچنین اگر اشتباهی در زاویه آتش تایریستورها یا اتصال کوتاه رخ دهد، این مبدل قابلیت

³ Current Source Converter

¹ Inductive Coupling Grid Connected Inverter

² Thyristor Controlled LC-Hybrid Active Power Filter



شکل ۱- ساختار TCLC-HAPF با اتصال پنل‌های خورشیدی

جدول ۱- مشخصات شبکه مورد مطالعه

شبکه توزیع	$f = 50 \text{ Hz}, V_{sx} = 400 \text{ v}, L_{sx} = 0.15 \text{ mH}$
TCLC-HAPF	$L_{cx} = 1 \mu\text{H}, L_{PF} = 15 \text{ mH}, C_{PF} = 260 \mu\text{F}, L_{dc} = 0.1 \mu\text{H}$
بار غیرخطی (۱)	یکسوکننده تائریستوری ۶پالسه با توان ۹ کیلووات
بار غیرخطی (۲)	یکسوکننده تائریستوری ۶پالسه با توان ۲ کیلووات

$$X_{TCLCxf}(\alpha_x) = \frac{\pi X_{LPF} X_{CPF}}{X_{CPF}(2\pi - 2\alpha_x + \sin 2\alpha_x) - \pi X_{LPF}} + X_{LCf} \quad (1)$$

$$X_{TCLCxn}(\alpha_x) = \frac{\pi X_{LPF} X_{CPF}}{X_{CPF}(2\pi - 2\alpha_x + \sin 2\alpha_x) - \pi X_{LPF}} + X_{LCn} \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)، X بیان‌کننده اندیس‌های سه فاز a, b, c است. f و n به ترتیب نشان‌دهنده فرکانس سیستم و مرتبه‌های هارمونیک است. همچنین X_{TCLCxf} و X_{TCLCxn} راکتانس TCLC به ترتیب برحسب فرکانس اصلی و فرکانس‌های مرتبه هارمونیک هستند. در این روابط، $X_{CPF} = \frac{1}{\omega C_{PF}}$ ، $X_{LPF} = L_{PF}\omega$ ، $X_{LCf} = L_C\omega$ و $X_{CPFn} = \frac{1}{n\omega C_{PF}}$ ، $X_{LPFn} = n\omega L_{PF}$ ، $X_{LCn} = n\omega L_C$ است. همچنین محدوده جبران‌سازی توان راکتیو بخش TCLC با کنترل α_x (زاویه آتش تائریستورهای TCLC) تنظیم می‌شود.

برای محاسبه زوایای آتش تائریستورهای بخش TCLC، نیاز است توان راکتیو تولیدشده در بخش TCLC $(Q_{cx_TCLCf}(\alpha_x))$ و توان راکتیو بار در فرکانس اصلی از

بارهای غیرخطی در این شبکه شامل دو یکسوکننده تائریستوری با بار RL با توان‌های ۹ کیلووات و ۲ کیلووات هستند. در این طرح، جبران‌سازی هارمونیک‌های مرتبه بالای جریان بار و بهبود ضریب قدرت در بخش TCLC انجام می‌شود و هارمونیک‌های مرتبه پایین برای جبران‌سازی به فیلتر فعال اعمال می‌گردند.

با توجه به شکل (۱)، در بخش TCLC، L_C ، L_{PF} و C_{PF} به ترتیب سلف متصل به شبکه، سلف کنترل‌شده با تائریستور (TCR) و خازن موازی هستند. در این شکل $T_1 - T_6$ تائریستورهای TCLC و $G_1 - G_6$ نیمه‌هادی‌های فیلتر فعال می‌باشند. همچنین i_{PV} ، جریان ورودی به فیلتر اکتیو از پنل‌های خورشیدی است. مؤلفه‌های هارمونیک برای سیستم سه فاز سه‌سیمه با حضور مبدل ۶ پالسه از رابطه $k = 1, 2, \dots, \infty$ به دست می‌آید [۱۴]. راکتانس بخش TCLC در فرکانس اصلی و فرکانس هارمونیک از روابط (۱) و (۲) به دست می‌آیند [۱۷]:

¹ Thyristor Controlled Reactor

کرد، به طوری که یک یا چند ویژگی فیلتر ترکیبی بهینه شود. در شکل (۲) بلوک دیاگرام کنترلی طرح پیشنهادی نشان داده شده است. در این مقاله از تئوری توان لحظه‌ای معرفی شده در [۲۹] برای تولید جریان مرجع مبدل منبع جریان استفاده می‌شود. در این روش، در هر لحظه مؤلفه ac توان ناشی از هارمونیک‌های موجود در جریان بار محاسبه می‌شود. پس از اعمال مؤلفه‌های هارمونیکی فرکانس پایین جریان بار و ولتاژ فاز شبکه به واحد محاسبه توان لحظه‌ای، جریان مرجع شامل هارمونیک‌های مرتبه پایین برای مبدل منبع جریان تولید می‌شود. فیلتر فعال CSC پیشنهادی مبتنی بر IGBT^۱ بوده، براساس ایده جداسازی مؤلفه‌های فرکانسی، وظیفه جبران‌سازی هارمونیک‌های مرتبه پایین را در شبکه انجام می‌دهد. در بخش TCLC، با اعمال ولتاژهای شبکه و جریان‌های بار شامل مؤلفه‌های هارمونیکی مرتبه بالا به بلوک محاسبه توان لحظه‌ای، توان راکتیو بار در فرکانس هارمونیکی تولید می‌شود. برای تولید زوایه آتش تایریستورها نیاز است α_x طبق رابطه $Q_{cx_TCLCf}(\alpha_x) = -Q_{Lxf}$ محاسبه شود. از سوی دیگر اگر Q_{Lxf} توان راکتیو تحویلی به بار در نظر گرفته شود، شرط $Q_{cx_TCLCf}(\alpha_x = 180^\circ) > |Q_{Lxf}|$ باید برقرار باشد.

در شکل (۲)، i_L ، I_{refL} ، i_c ، i_{c-dc} و i_{pv} به ترتیب جریان بار، جریان مرجع شامل هارمونیک‌های مرتبه پایین، جریان جبران‌سازی شده، جریان سمت DC و جریان سلول‌های خورشیدی هستند.

کنترل‌کننده جریان خط DC (i_{c-dc}) در مبدل CSC متصل به پنل‌های خورشیدی شامل دو کنترل‌کننده PI با ضرایب k_p و k_q برای تولید جریان مرجع i_{cx-dc} براساس اختلاف تغییرات ولتاژ (ΔV_{dc}) بین V_{ac} و V_{mmp} است. مقدار حداکثر توان (MPPT^۲) پنل‌های خورشیدی طبق روش‌های مختلف پیشنهاد شده، از جمله مرجع [۳۰] محاسبه می‌شود.

در شکل (۲)، i_L ، I_{refL} ، i_c ، i_{c-dc} و i_{pv} به ترتیب جریان بار، جریان مرجع شامل هارمونیک‌های مرتبه پایین، جریان جبران‌سازی شده، جریان سمت DC و جریان پنل‌های خورشیدی هستند.

طریق رابطه (۳) محاسبه شوند. در این رابطه، توان راکتیو تولیدی با مقدار تغییرات ولتاژ شبکه، رابطه مستقیم دارد. طبق رابطه (۳) توان راکتیو تزریقی توسط TCLC با مقدار راکتانس TCLC رابطه عکس دارد و بر این اساس، با قرار دادن رابطه (۱) در رابطه (۳) مقدار توان راکتیو تزریقی با زوایه آتش تایریستور کنترل می‌شود. طبق روابط (۱) و (۲) و براساس تحلیل انجام شده در مرجع [۲۴]، کمترین راکتانس پس‌فاز و پیش‌فاز در TCLC، به ترتیب به‌ازای $\alpha_x = 90^\circ$ و $\alpha_x = 180^\circ$ حاصل می‌شود. به این ترتیب، طبق رابطه (۳)، توان راکتیو بخش TCLC به‌ازای $\alpha_x = 90^\circ$ در بیشترین مقدار سلفی و به‌ازای $\alpha_x = 180^\circ$ در بیشترین مقدار خازنی خود قرار دارد. بنابراین محدوده α_x در بخش TCLC بین ۹۰ و ۱۸۰ درجه محدود می‌شود.

$$Q_{cx_TCLCf}(\alpha_x) = \frac{V_x^2}{X_{TCLCf}(\alpha_x)} \quad (3)$$

۳- روش کنترلی

جریان بار در شبکه توزیع مورد مطالعه شامل هارمونیک‌های مرتبه ۱، ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱، ۱۳ و... هستند که طبق رابطه (۴) به دو بخش مؤلفه‌های فرکانس بالا (f_H) و مؤلفه‌های فرکانس پایین (f_L) تفکیک شده، جریان فیلتر را شکل می‌دهند.

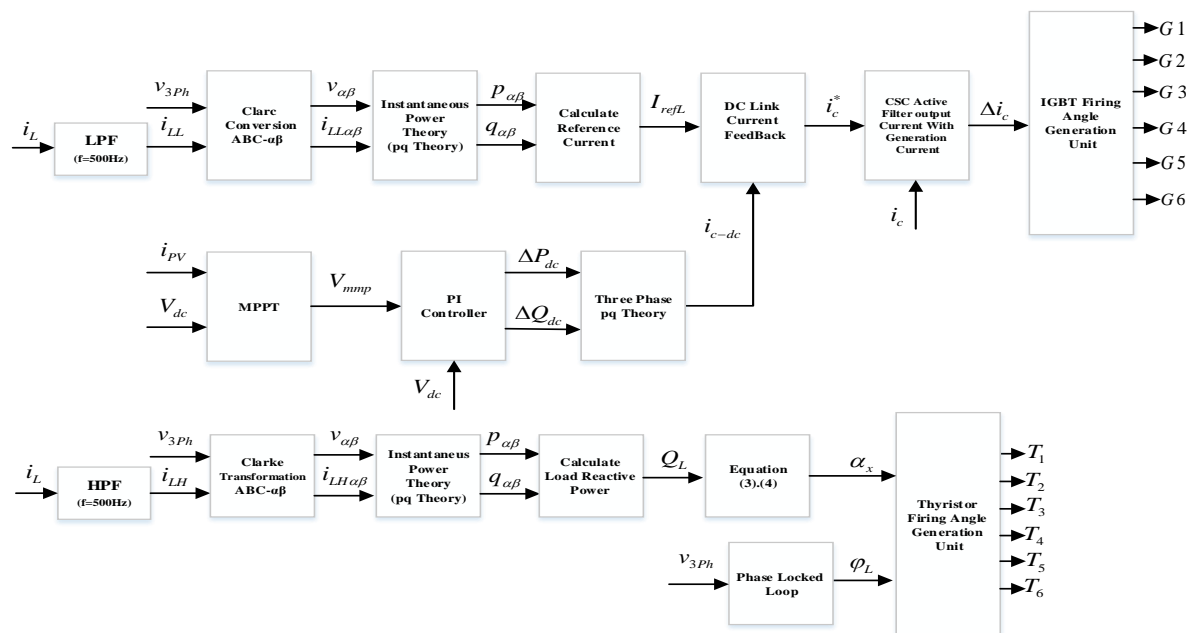
$$f_{Filter} = f_L + f_H, \quad \begin{cases} 3f_{sys} < f_L \leq kf_{sys} \\ f_H \geq kf_{sys} \end{cases} \quad (4)$$

k در رابطه بالا، مرتبه هارمونیکی است که مرز فرکانس‌های کم و زیاد بوده، در هر پروژه طبق معیارهای تعریف شده، متغیر است.

در این مقاله با توجه به یکسان بودن ماهیت بار و جبران‌کننده با سیستم مورد مطالعه در [۲۷] که مبتنی بر ایده جداسازی فرکانسی جریان هارمونیکی بار بوده است، فرکانس تفکیک براساس معیارهای مطرح شده در این مقاله در همان فرکانس ۵۰۰ هرتز تنظیم می‌شود؛ یعنی هارمونیک‌های با فرکانس بیش از ۵۰۰ هرتز را به فیلتر پس‌یو قابل کنترل با تایریستور و هارمونیک‌های پایین‌تر به فیلتر فعال CSC اعمال می‌شود، اگرچه در این مرحله می‌توان با اهداف متنوع نسبت به تعیین فرکانس تفکیک اقدام

² Maximum Power Point Tracking

¹ Isolation Gate Bipolar Transistor



شکل ۲- بلوک دیاگرام طرح پیشنهادی

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی شبکه مورد مطالعه در دو محیط نرم‌افزاری PSCAD/EMTDC و MatLab/Simulink آورده شده است. مطالعات هارمونیک و جبران توان راکتیو شبکه توزیع ابتدا با حضور بار تایریستوری با توان ۹ کیلووات بررسی می‌شود. سپس با ورود بار تایریستوری ۲ کیلووات پل‌های خورشیدی متصل گردیده، توان اکتیو اضافه‌شده را تأمین می‌کنند.

۴-۱- مطالعه هارمونیک و توان راکتیو با بار یکسوکننده تایریستوری ۹ کیلووات

شکل (۳) برای نشان دادن عملکرد صحیح TCLC-HAPF مبتنی بر ایده جداسازی مؤلفه‌های هارمونیک آورده شده است. جریان مرجع تولیدشده با جریان جبران سازی شده خروجی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. همان طور که نشان داده شده، جریان جبران‌سازی به خوبی جریان مرجع خود را ردیابی می‌کند. اختلافی که دیده می‌شود به دلیل المان‌های پسیو TCLC است. با انتخاب مقادیر بزرگ تر می‌توان این مقدار اختلاف را کاهش داد، به طوری که جریان خروجی فیلتر با اغتشاش کمتری همراه باشد، ولی از سوی دیگر، تلفات فیلتر را افزایش می‌دهد.

طبق استاندارد IEEE519-2014، مقدار اعوجاج هارمونیک کلی جریان باید مقداری در حدود $THD \leq 12\%$ داشته باشد [۳۲]. در شکل (۴) مقدار اعوجاج

توان تولیدی مجموعه پل‌های خورشیدی از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد [۳۱]. در این رابطه، n_p تعداد رشته‌های موازی، n_s تعداد سلول PV^۱ سری شده هر رشته، P_{pv} توان تولیدی مجموعه پل‌های خورشیدی، V_{dc} ولتاژ لینک DC، i_{pv} جریان مجموعه پل‌های خورشیدی، I_{ph} جریان اتصال کوتاه پل‌های خورشیدی، I_{rs} جریان اشباع معکوس پیوند p-n پل خورشیدی، T دمای پیوند p-n پل خورشیدی برحسب کلونین، A ضریب ایده آل پیوند p-n وابسته به تکنولوژی ساخت پل‌های خورشیدی، k ثابت بولتزمن و $q = 1.602 \times 10^{-19} (C)$ بار الکتریکی هستند. با در نظر گرفتن روش MPPT ضمن بهره‌برداری بهینه از پل‌های خورشیدی می‌توان تأثیر عوامل محیطی مختلف از جمله تغییرات شدت تابش خورشید را روی عملکرد و پایداری پل‌های خورشیدی در نظر گرفت. بنابراین خروجی سیستم کنترل MPPT به عنوان ولتاژ مرجع لینک DC در مبدل CSC در نظر گرفته می‌شود. در بلوک دیاگرام کنترل جریان DC، مؤلفه ΔQ_{dc} بیانگر مقدار تغییرات ولتاژ DC و همچنین مؤلفه ΔP_{dc} بیانگر مقدار تلفات مبدل در زمان شروع به کار است.

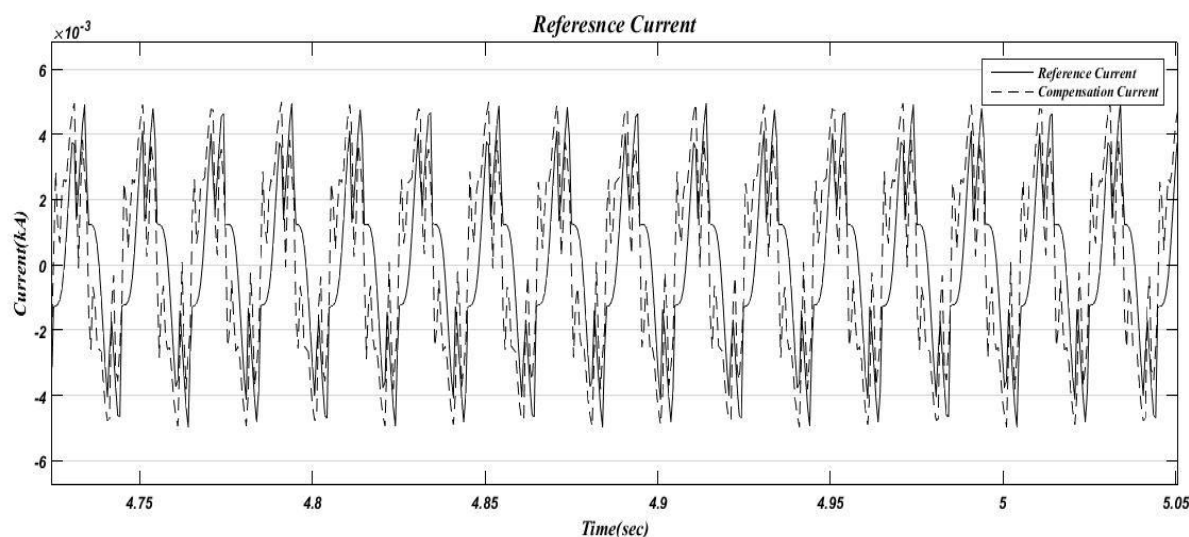
$$P_{pv} = V_{dc} i_{pv} = n_p I_{ph} V_{dc} - n_p I_{rs} V_{dc} \left(e^{\frac{qV_{dc}}{kTAn_s}} - 1 \right) \quad (5)$$

۴-۲ نتایج شبیه‌سازی

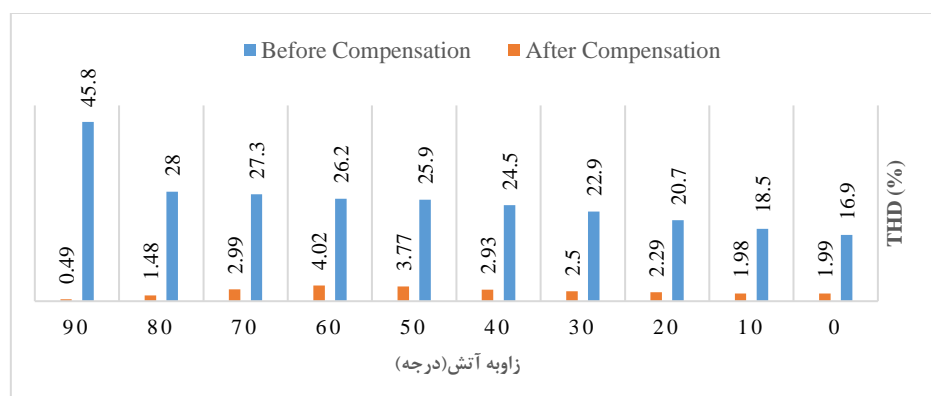
^۱ Photovoltaic

TCLC-HAPF مقدار ضریب قدرت به $PF \geq 0.96$ می‌رسد. شکل (۶)، نمودار میله‌ای ضریب قدرت شبکه را قبل و بعد از اعمال جبران‌کننده نشان می‌دهد. شکل (۷)، ضریب قدرت شبکه را به ازای فرکانس‌های تفکیک مختلف و در حالتی که زاویه آتش مبدل تایریستوری به‌عنوان بار غیرخطی در صفر درجه تنظیم شده است، نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که تغییر فرکانس تفکیک، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در ضریب قدرت شبکه ندارد. علت این است که توان راکتیو بار مستقل از فرکانس تفکیک، توسط بخش TCLC تأمین می‌شود. اگرچه در محدوده ۵۰۰ هرتز نسبتاً ضریب قدرت بهتری حاصل شده است.

هارمونیکی کل (THD^۱) جریان شبکه توزیع برای زوایای آتش ۰-۹۰ درجه در یکسوکننده تایریستوری ۹ کیلوواتی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بعد از جبران‌سازی مقدار اعوجاج هارمونیکی کل به مقداری پایین‌تر از ۵ درصد ($THD \leq 5\%$) رسیده است. شکل (۵) جریان شبکه I_{sx} را قبل و بعد از اعمال جبران‌کننده نشان می‌دهد. شرایط کاری شبکه یکسان فرض شده است، به‌عنوان مثال، ماهیت بارها یکسان بوده و کلیدزنی یکسوکننده در زاویه آتش صفر درجه انجام شده است. براساس استاندارد IEEE519-2014، مقدار ضریب قدرت برای یک شبکه دارای آلودگی هارمونیکی باید مقداری بیشتر از ۹۶ باشد. بعد از نصب جبران‌کننده

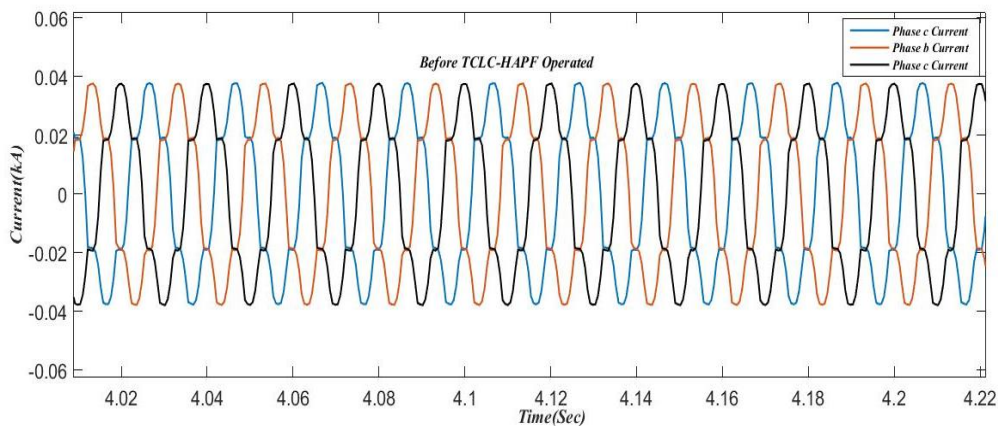


شکل ۳- جریان مرجع و جریان جبران‌کننده به‌صورت هم‌زمان

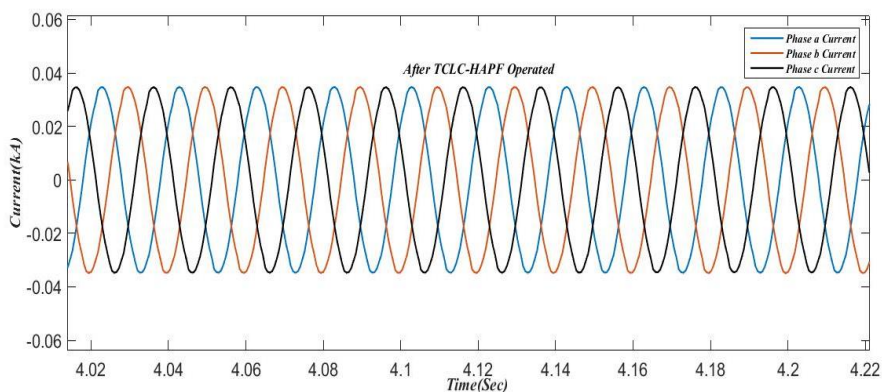


شکل ۴- THD جریان شبکه در زوایای آتش ۰-۹۰ درجه

^۱ Total Harmonic Distortion

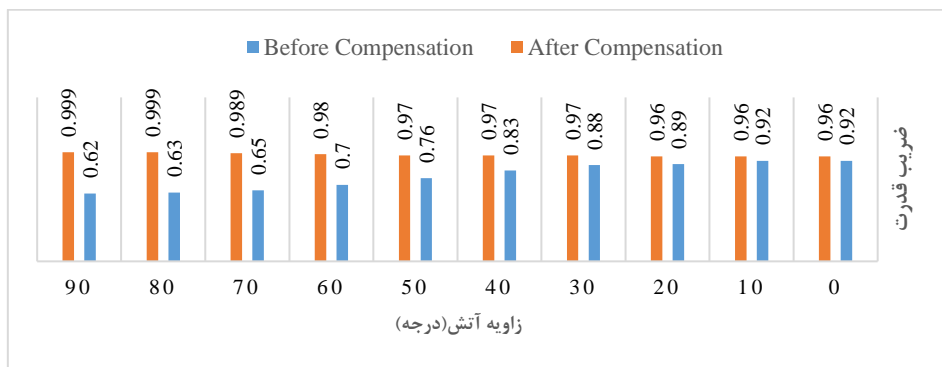


(الف)

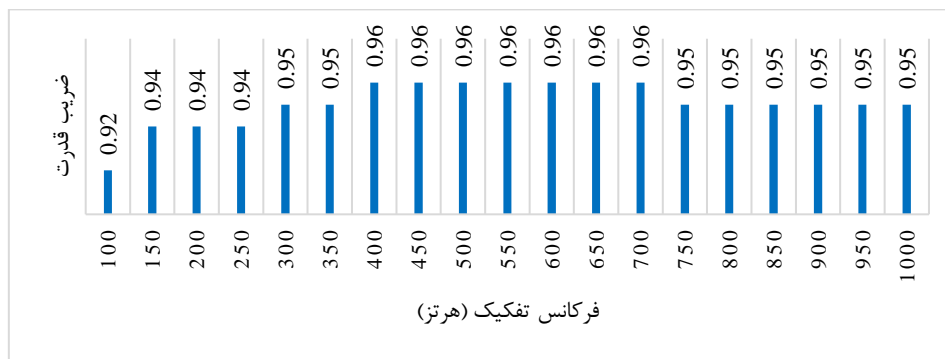


(ب)

شکل ۵- جریان شبکه الف) قبل، ب) بعد از جبران سازی



شکل ۶- ضریب قدرت شبکه قبل و بعد از جبران سازی



شکل ۷- ضریب قدرت در فرکانسهای تفکیک مختلف و بار ثابت

های طراحی شده بوده است. ظرفیت یک مبدل DC/AC وابسته به تجهیزات مورد استفاده در مبدل‌هاست. کلیدهای نیمه‌هادی مهم‌ترین تجهیز در این مبدل‌ها هستند که مقدار ظرفیت آن‌ها طبق رابطه (۶) به دو عامل ولتاژ DC مبدل و جریان کلیدزنی وابسته است.

$$S_{IGBT} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times V_{DC} \times I_{SW} \quad (6)$$

با اتصال پنل‌های خورشیدی، مقدار ولتاژ DC افزایش می‌یابد؛ ولی جریان کلیدزنی (I_{SW}) عبوری از کلیدها با در نظر گرفتن جریان مرجع با حضور تمام هارمونیک‌ها طبق رابطه (۷) خواهد بود:

$$I_{SW} = I_{REFERENCE} = I_{h5,7} + I_{h11,13} \quad (7)$$

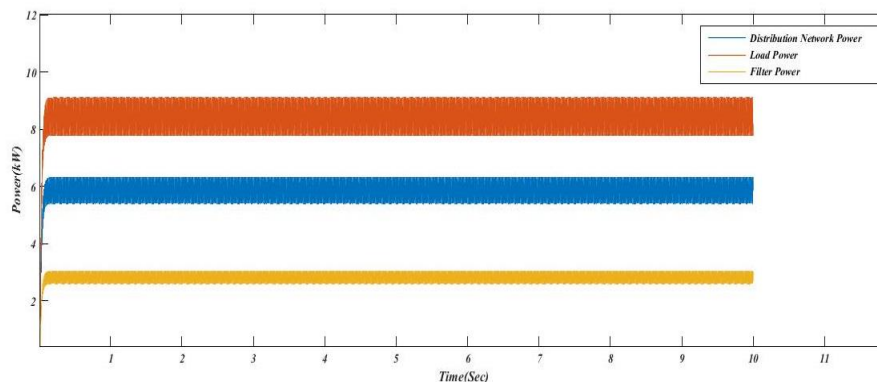
با تکیه بر ایده جداسازی مؤلفه‌های فرکانسی و اعمال مؤلفه‌های فرکانس پایین جریان مرجع به مبدل CSC در طرح TCLC-HAPF، در مقایسه با اعمال جریان با تمام مؤلفه‌های فرکانسی به مبدل، ظرفیت کلیدهای نیمه‌هادی کاهش می‌یابد. با کاهش ظرفیت کلیدهای نیمه‌هادی و همچنین با جداسازی مؤلفه‌های فرکانسی، جریان عبوری از فیلتر فعال نیز کاهش می‌یابد و به دنبال آن، ظرفیت مبدل CSC نیز کاهش داده می‌شود.

۲-۴- تزریق توان اکتیو با اتصال پنل‌های خورشیدی و ورود بار یکسوکننده تائریستوری ۲ کیلووات

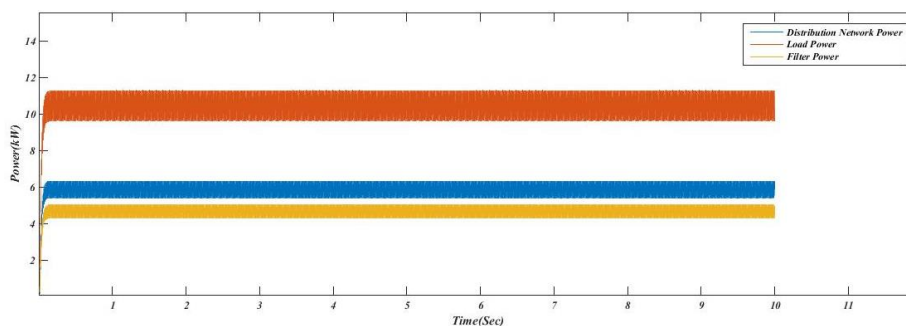
پنل‌های خورشیدی براساس نحوه طراحی، می‌توانند توان‌های متفاوتی را به شبکه توزیع تزریق کنند. در شکل (۸) توان اکتیو بار یکسوکننده تائریستوری (۹ کیلووات)، توان اکتیو شبکه توزیع و توان اکتیو فیلتر (TCLC-HAPF) قبل از ورود بار یکسوکننده تائریستوری ۲ کیلوواتی آورده شده است. در این شکل، مجموع توان‌های شبکه توزیع و توان فیلتر، بار یکسوکننده تائریستوری ۹ کیلوواتی را تغذیه می‌کنند. طبق شکل (۹) با اتصال بار یکسوکننده تائریستوری ۲ کیلوواتی به شبکه توزیع، مجموع توان بارهای شبکه به مقدار ۱۱ کیلووات افزایش یافته است. در این حالت توان شبکه توزیع ثابت بوده و جبران‌کننده این توان را تأمین می‌کند. مقدار ضریب قدرت شبکه با افزایش مقدار بار یکسوکننده تائریستوری نیز در شکل (۱۰) مورد بررسی قرار گرفته است. این شکل پس از افزایش توان بار، مقدار توان راکتیو شبکه را نشان می‌دهد که در حدود ۲٫۵ کیلووات است. به عبارت دیگر، مقدار ضریب قدرت شبکه در این حالت، حدود ۰٫۹۶ می‌شود.

۳-۴- ظرفیت مبدل CSC

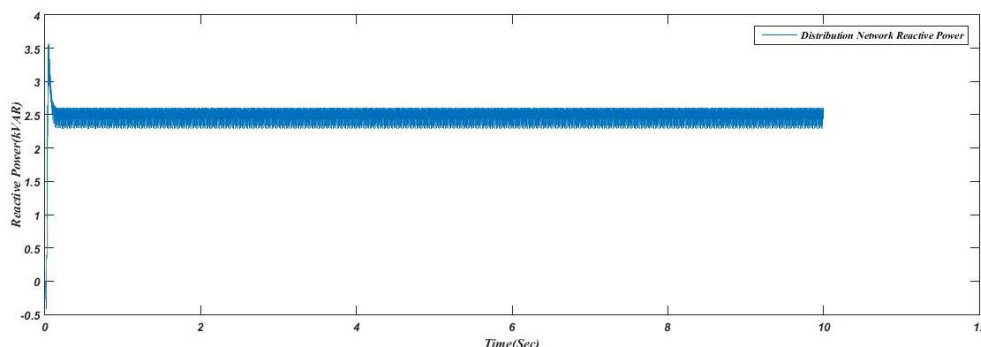
مقدار کاهش ظرفیت مبدل‌های DC/AC همواره از دغدغه



شکل ۸- توان اکتیو بار، شبکه و جبران‌کننده قبل از ورود بار یکسوکننده تائریستوری ۲ کیلووات



شکل ۹- توان اکتیو بار، شبکه و جبران‌کننده بعد از ورود بار یکسوکننده تائریستوری ۲ کیلووات



شکل ۱۰- توان راکتیو شبکه بعد از ورود بار یکسوکننده تائریستوری ۲ کیلووات

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، اتصال سلول خورشیدی به شبکه سه فاز و بار محلی از طریق ساختار ترکیبی TCLC-HAPF شامل مبدل منبع جریان (CSC) با ظرفیت نامی کمتر از ظرفیت کل جبران کننده و بخش پسیو کنترل شده با تائریستور (TCLC) پیشنهاد شده است. توان مبادله شده براساس ایده جداسازی مؤلفه های فرکانسی، بین این دو بخش تقسیم می شود. عملکرد طرح پیشنهادی در ۱۰ زاویه آتش مختلف بار غیرخطی (یکسوکننده تائریستوری با بار RL) نشان داد هارمونیک و ضریب قدرت در شبکه مورد مطالعه جبران سازی شده، الزامات استاندارد IEEE519-2014 را نیز برآورده می سازد. همچنین با اتصال پنل های خورشیدی در سمت DC فیلتر اکتیو مبتنی بر مبدل منبع جریان، توان حاصل از انرژی خورشیدی از طریق TCLC-HAPF به شبکه توزیع تزریق می شود. نتایج شبیه سازی نشان دادند تقسیم توان های اکتیو و راکتیو بین شبکه و جبران کننده به گونه ای است که نه تنها ظرفیت توان انتقالی شبکه افزایش می یابد، بلکه توان راکتیو شبکه در سطحی قرار می گیرد که ضریب قدرت در محدوده مجاز حفظ شود. انتخاب فرکانس تفکیک براساس معیارهایی همچون تلفات یا هزینه و حتی بهینه سازی آن توسط الگوریتم های بهینه سازی به عنوان زمینه های تحقیقاتی پیش رو مطرح است.

علائم

هارمونیک کل	h	در این مقاله، اتصال سلول خورشیدی به شبکه سه فاز و بار محلی از طریق ساختار ترکیبی TCLC-HAPF شامل مبدل منبع جریان (CSC) با ظرفیت نامی کمتر از ظرفیت کل جبران کننده و بخش پسیو کنترل شده با تائریستور (TCLC) پیشنهاد شده است. توان مبادله شده براساس ایده جداسازی مؤلفه های فرکانسی، بین این دو بخش تقسیم می شود. عملکرد طرح پیشنهادی در ۱۰ زاویه آتش مختلف بار غیرخطی (یکسوکننده تائریستوری با بار RL) نشان داد هارمونیک و ضریب قدرت در شبکه مورد مطالعه جبران سازی شده، الزامات استاندارد IEEE519-2014 را نیز برآورده می سازد. همچنین با اتصال پنل های خورشیدی در سمت DC فیلتر اکتیو مبتنی بر مبدل منبع جریان، توان حاصل از انرژی خورشیدی از طریق TCLC-HAPF به شبکه توزیع تزریق می شود. نتایج شبیه سازی نشان دادند تقسیم توان های اکتیو و راکتیو بین شبکه و جبران کننده به گونه ای است که نه تنها ظرفیت توان انتقالی شبکه افزایش می یابد، بلکه توان راکتیو شبکه در سطحی قرار می گیرد که ضریب قدرت در محدوده مجاز حفظ شود. انتخاب فرکانس تفکیک براساس معیارهایی همچون تلفات یا هزینه و حتی بهینه سازی آن توسط الگوریتم های بهینه سازی به عنوان زمینه های تحقیقاتی پیش رو مطرح است.
راکتانس برحسب فرکانس اصلی بخش TCLC	X_{TCLCf}	
راکتانس بخش TCLC برحسب فرکانس های مرتبه هارمونیکی	X_{TCLCn}	
ضریب بهره کنترل کننده PI	k_p	
ضریب بهره کنترل کننده PI	k_q	
مقدار تغییرات ولتاژ DC	ΔQ_{dc}	
مقدار تلفات مبدل فعال	ΔP_{dc}	
راکتانس سلف متصل به شبکه بخش TCLC در فرکانس اصلی	X_{LCf}	
راکتانس سلف کنترل شده با تائریستور بخش TCLC در فرکانس اصلی	X_{LPIF}	
راکتانس خازن موازی بخش TCLC در فرکانس اصلی	X_{CPFF}	
راکتانس سلف متصل به شبکه بخش TCLC در فرکانس هارمونیکی	X_{LCn}	
راکتانس سلف کنترل شده با تائریستور بخش TCLC در فرکانس هارمونیکی	X_{LPIFn}	
راکتانس خازن موازی بخش TCLC در فرکانس هارمونیکی	X_{CPFn}	
توان راکتیو بار در فرکانس اصلی	$Q_{cx,TCLCf}$	
جریان بار	i_L	
جریان مرجع شامل هارمونیک های پایین	I_{refL}	
جریان سمت DC	i_{c-dc}	
جریان سلول های خورشیدی	i_{pV}	سلف متصل به شبکه
تعداد رشته های موازی	n_p	سلف کنترل شده با تائریستور
تعداد سلول های خورشیدی سری شده	n_s	خازن موازی
توان تولیدی مجموعه پنل های خورشیدی	P_{pV}	زوایای آتش تائریستورهای TCLC
ولتاژ خط dc	V_{dc}	زوایای آتش نیمه هادی های فیلتر فعال
جریان مجموعه پنل های خورشیدی	i_{pV}	فرکانس سیستم
جریان اتصال کوتاه پنل های خورشیدی	I_{ph}	مرتبه هارمونیکی
جریان اشباع معکوس پیوند p-n پنل خورشیدی	I_{rs}	

IGBT	توان نیمه هادی	S_{IGBT}	دمای پیوند p-n پنل خورشیدی بر حسب کلین	T
IGBT	جریان کلیدزنی	I_{SW}	ضریب ایدئال p-n پنل خورشیدی	A
			ثابت بولتزمن	k

مراجع

- [۱] زهرا مروج و جواد آذرخش، «شبیه‌سازی و طبقه‌بندی وقایع کیفیت توان با استفاده از شبکه عصبی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۳۷-۱۴۶.
- [۲] زهرا مروج، علی‌اکبر عبدوس و محمد یازکی، «ارائه یک روش هوشمند برای شناسایی و طبقه‌بندی وقایع کیفیت توان»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۹، شماره ۲۷، زمستان ۱۳۹۰، صفحه ۲۳-۳۶.
- [3] N. Rai and S. Chakravorty "A Review on the Generalized Formulations for Selective Harmonic Elimination (SHE-PWM) strategy", IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC), Nagpur, India, Vol. 2, September 2020, pp. 1-6.
- [4] M. Wu, Y.W. Li and G. Konstantinou, "A Comprehensive Review of Capacitor Voltage Balancing Strategies for Multilevel Converters Under Selective Harmonic Elimination PWM", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 36, No. 3, March 2021, pp. 2748-2767.
- [5] P. Sen, P. Biringer and R. Segsworth, "Thyristor-controlled single phase variable inductor", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3, No. 3, September 1967, pp. 240-245.
- [6] L.J. Bohmann and R.H. Lasseter, "Harmonic interactions in thyristor controlled reactor circuits", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 4, No. 3, March 1989, pp. 1919-1926.
- [7] Z. Li, X. Yu and R. Ban "The changes of inductors inductances and resistances in inductive pulse power supply", IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC), Brighton, United Kingdom, Vol.2, June 2017, pp. 1-4.
- [8] Y. Sato, T. Sugita and T. Kataoka, "A new control method for current source active power filters", IAS '97 Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting, New Orleans, LA, USA, Vol. 2, October 1997, pp. 1463-1470.
- [9] W.P. Komrumpf and J.P. Waiden, "Power factor of active filtering systems", IEEE Transactions on Power Electron, Vol.1, June 1976, pp. 318-325.
- [10] A. Zafari, and M. Jazaeri, "STATCOM systems in distribution and transmission system applications: a review of power-stage topologies and control methods", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 26, No. 2, February 2016, pp. 323-346.
- [11] C. Zhao and et al, "Optimized design of full-bridge modular multilevel converter with low energy storage requirements for hvdc transmission system", IEEE Transactions on Power Electron, Vol. 33, No. 1, January 2018, pp. 97-109.
- [12] D. Bernet and M. Hiller, "Grid-connected medium-voltage converters with parallel voltage-source active filters", IEEE Transactions on Electric Power Applications, Vol. 13, No. 10, May 2019, pp. 1507-1513.
- [13] A. Zafari, and M. Jazaeri, "A novel structure of hybrid active power filter based on voltage-current source converter (VCSC-HAPF)", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 27, No. 4, April 2017, pp. 22-99.
- [14] H.M.A. Antunes, I.A. Pires and S.M. Silva, "Evaluation of Series and Parallel Hybrid Filters Applied to Hot Strip Mills With Cycloconverters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 55, No. 6, August 2019, pp. 6643-6651.
- [15] F. Rong, X. Gong and H. Shoudao, "A novel grid-connected PV system based on MMC to get the maximum power under partial shading conditions", IEEE Transactions on Power Electron, Vol. 32, No. 6, June 2017, pp. 4320-4333.
- [16] F. Barati, A. Mazaheri and M. Jamil, "A Simulation-Aided LCL Filter Design for Grid-Interactive Three-Phase Photovoltaic Inverters", Journal of Solar Energy Research, Vol. 4, No. 4, Autumn 2019, pp. 229-236.
- [17] N. Kumar, T.K. Saha and J. Dey, "Sliding-mode control of PWM dual inverter-based grid-connected PV system: modeling and performance analysis", IEEE Transactions on Power Electron, Vol. 4, No. 2, June 2016, pp. 435-444.

- [18] M. Javid and F. Barati, "An LCL Filter Design for Three-Phase Off-Grid PV Inverters", *Journal of Solar Energy Research*, Vol. 3, No. 1, Winter 2018, pp. 29–33.
- [19] A. Sangwongwanich, Y. Yang and F. Blaabjerg, "A sensorless power reserve control strategy for two-stage grid-connected PV systems", *IEEE Transactions on Power Electron*, Vol. 32, No. 11, November 2017, pp. 8559–8569.
- [20] F.J. Lin, K.C. Lu, T.H. Ke, B.H. Yang and Y.R. Chang, "Reactive power control of three-phase grid-connected PV system during grid faults using Takagi–Sugeno–Kang probabilistic fuzzy neural network control", *IEEE Transactions on Ind Electron*, Vol. 62, No. 9, September 2015, pp. 5516–5528.
- [21] L. Cao, K.H. Loo and Y.M. Lai, "Output-impedance shaping of bidirectional DAB dc–dc converter using double-proportional-integral feedback for near-ripple-free dc bus voltage regulation in renewable energy systems", *IEEE Transactions on Power Electron*, Vol. 31, No. 3, March 2016, pp. 2187–2199.
- [22] Y. Bae, T.K. Vu and R.Y. Kim, "Implemental control strategy for grid stabilization of grid-connected PV system based on german grid code in symmetrical low-to-medium voltage network", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 28, No. 3, September 2013, pp. 619–631.
- [23] B.N. Alajmi, K.H. Ahmed, G.P. Adam and B.W. Williams, "Single-phase single-stage transformer less grid-connected PV system", *IEEE Transactions on Power Electron*, Vol. 28, No. 6, June 2013, pp. 2664–2676.
- [24] 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, 2018, pp. 6755-6768.
- [25] S. Rahmani, A. Hamadi and K. Al-Haddad, "A combination of shunt hybrid power filter and thyristor-controlled reactor for power quality", *IEEE Transactions Ind Electron*, Vol. 61, No. 5, May 2014, pp. 2152–2164.
- [۲۶] علیرضا ابراهیمی، عباس دیدبان و رضا کی‌پور، «استراتژی کنترلی نوین در سیستم‌های انرژی ترکیبی بادی-خورشیدی بر مبنای تعیین محدوده‌های بهینه شارژ و دشارژ باتری‌ها در بازه‌های زمانی مختلف»، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۶، شماره ۵۵، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۱۶۳–۱۷۳.
- [۲۷] محمد سلمانی کویخی، مصطفی جزائری و علی زعفری، «ارائه ساختاری نوین از یک فیلتر ترکیبی کارا بر مبنای تفکیک فرکانس جریان مرجع به منظور جبران هم‌زمان هارمونیک و توان راکتیو در شبکه توزیع»، *مجله کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران*، دوره ۸، شماره ۲، پاییز ۱۳۹۸، صفحه ۷۵–۹۰.
- [۲۸] علی زعفری و مصطفی جزائری، «تجزیه و تحلیل تلفات در فیلتر فعال یکپارچه موازی مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ-مبدل منبع جریان (طرح VCSC)»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۸، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۱۵۷۱–۱۵۸۲.
- [29] R. Dehini, A. Gencer and G. Hachemi, "D-Statcom-Fuel Cell Energy Control System Based on Instantaneous Reactive Power Theory", 2nd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Izmir, Turkey, Vol. 2, October 2020, pp. 65-70.
- [30] P. Mazaheri Salehi and D. Solyali, "A review on maximum power point tracker methods and their applications", *Journal of Solar Energy Research*, Vol. 3, No. 2, August 2018, pp. 123–133.
- [31] P.P. Dash and M. Kazerani, "Dynamic Modeling and Performance Analysis of a Grid-Connected CurrentSource Inverter Based Photovoltaic System", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 2, No. 4, October 2011, pp. 443–450.
- [32] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", in *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std5191992)*, June 2014, pp.1-29.