

بررسی هارمونیکی نیروگاه خورشیدی ۱۰۰kw

متصل به شبکه

محسن قاینی

دانشکده برق - گروه قدرت

دانشگاه صنعتی سجاد

مشهد، ایران

m_ghayeni@sadjad.ac.ir

مجیب حق بین

دانشکده برق - گروه قدرت

دانشگاه صنعتی سجاد

مشهد، ایران

moin_ha2002@yahoo.com

کشورهای جهان استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک در سال‌های اخیر به شدت افزایش یافته است.

یکی از موانع اساسی در رشد سریع سیستم‌های فتوولتائیک در سال‌های گذشته، قیمت بالای تولید یک کیلووات برق خورشیدی در مقایسه با منابع فسیلی بوده است. اما در سال‌های اخیر هرچه قیمت نفت در جهان رو به افزایش بود و از طرفی قیمت پانل‌های خورشیدی با کاهش چشمگیری همراه بود، که این موضوع دلیلی برای سوق کشورهای مختلف به سمت سیستم‌های فتوولتائیک بوده است. به عنوان نمونه، همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود، پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۲۰ قیمت هر کیلووات ساعت برق خورشیدی به کمتر از ۰/۰۵ دلار کاهش یابد [۱].

امروزه توجه شرکت‌های برق منطقه‌ای و مشترکین آنها به شکل روزافزونی به مسئله کیفیت توان معطوف شده است. واژه کیفیت توان در کشورهای صنعتی و در صنعت برق کاربرد بسیاری پیدا کرده است. مبحث کیفیت توان تعداد بسیار زیادی از اعوجاج‌های شبکه را پوشش می‌دهد. موضوعاتی که تحت مبحث کیفیت توان قرار می‌گیرند لزوماً مفاهیم تازه‌ای نیستند، لیکن آنچه جدید است تلاش مهندسين برای جمع‌آوری این مطالب

چکیده — جهت اتصال سیستم‌های فتوولتائیک به شبکه می‌بایست از مبدل‌های الکترونیک قدرت استفاده کرد. وجود این مبدل‌ها به دلیل ماهیت غیرخطی باعث ایجاد هارمونیکی در شبکه می‌شود. از طرفی بارهای غیرخطی صنعتی و خانگی نیز باعث ایجاد هارمونیکی در ولتاژ و جریان شبکه می‌شوند. در این مقاله وضعیت هارمونیکی یک نیروگاه ۱۰۰kw از سیستم‌های فتوولتائیک دارای بار محلی خطی و غیرخطی متصل به شبکه مورد ارزیابی قرار گرفته است. حالت‌های مختلف بار محلی کمتر یا بیشتر از توان تولیدی نیروگاه برای بار محلی خطی و غیرخطی بررسی و مطالعات هارمونیکی انجام شده است. برای انجام این کار از سیمولینک نرم افزار MATLAB استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی - سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه؛ اینورتر؛ کیفیت توان؛ آنالیز FFT اعوجاج هارمونیکی جریان

۱. مقدمه

سیستم‌های فتوولتائیک، انرژی خورشیدی را به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند و در مقایسه با سیستم‌های سنتی تولید انرژی الکتریکی، دارای آلودگی زیست محیطی نمی‌باشند، که به همین دلیل این سیستم‌ها را جزو منابع انرژی «سبز» بر می‌شمارند. همزمان با افزایش مشکلات زیست محیطی و کاهش ذخایر انرژی‌های فسیلی، در اکثر

بررسی هارمونیکی نیروگاه خورشیدی ۱۰۰kW متصل به شبکه

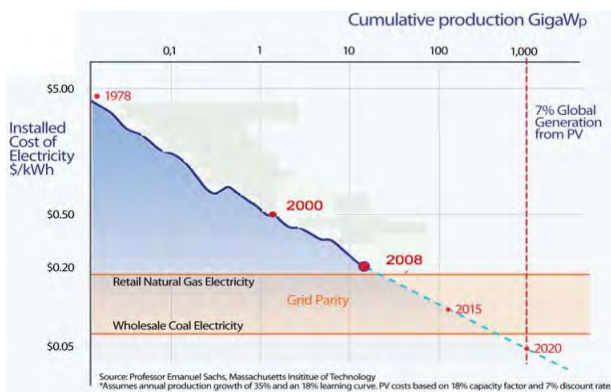
هفتمین کنفرانس مهندسی برق و الکترونیک ایران - ۱۳۹۴ دانشگاه آزاد اسلامی گناباد

از ادوات الکترونیک قدرت موجب بروز هارمونیکی در ولتاژ خروجی سیستم فتوولتائیک می‌شود که بایستی تا آنجا که امکان دارد این هارمونیکی‌ها کنترل و حذف شود. بارهای غیرخطی صنعتی و خانگی نیز باعث ایجاد هارمونیکی در ولتاژ و جریان شبکه می‌شوند.

تعدادی از مطالعات گذشته، برای نشان دادن اهمیت بررسی موضوع این مقاله عبارتند از: مرجع [۲] اعوجاج هارمونیکی جریان یک سیستم تکفاز متصل به شبکه تحت شرایط عملکردی مختلف را مدلسازی کرده و مورد آنالیز قرار داده است. مرجع [۵] تکنیک جدیدی برای جبران خودکار هارمونیکی و جلوگیری از جریان ناشی ارائه داده است. مرجع [۶] روشی برای جلوگیری از جزیره شده سیستم فتوولتائیک با استفاده از تزریق هارمونیکی ارائه داده است. مرجع [۷] دو طرح جدید اینورترهای خورشیدی برای کاهش هارمونیکی با هم مقایسه کرده است. نویسندگان [۸] روش جدیدی برای تخمین هارمونیکی جریان یک سیستم فتوولتائیک تحت شرایط کنترل ولتاژ ارائه کردند. نویسندگان [۹] روش محاسبه فیلتر اکتیو برای رفع هارمونیکی در سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه و جدا از شبکه را بیان کرده است. مرجع [۱۰] اعوجاج هارمونیکی جریان برای یک سیستم تک فاز متصل به شبکه برای دو حالت هوای صاف و ابری مورد آنالیز قرار داده است. مراجع [۱۱، ۱۲، ۱۳] اعوجاج هارمونیکی را برای سیستم‌های مختلف مورد آنالیز قرار داده اند. نویسندگان [۱۴] تکنیک مدولاسیون جدیدی برای کاهش اعوجاج هارمونیکی جریان ارائه دادند.

با توجه به اهمیت بررسی اعوجاج هارمونیکی جریان که در مطالعات گذشته کاملاً دیده می‌شود، در این مقاله سعی شده اعوجاج هارمونیکی جریان یک سیستم سه فاز فتوولتائیک متصل به شبکه تحت شرایط بارهای مختلف خطی و غیرخطی مورد آنالیز قرار بگیرد، تا نتایج این آنالیز برای طراحی سیستم‌های فتوولتائیک آینده برای بهتر کردن عملکرد کلی شبکه مورد استفاده باشد.

ادامه این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. در بخش دو اجزای مختلف سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه، هر یک به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته شده است. در بخش ۳ نتایج و خروجی‌ها شبیه‌سازی تحت شرایط بارهای مختلف ثبت و آنالیز FFT اعوجاج هارمونیکی جریان صورت گرفته است. در نهایت در بخش ۴ با توجه به خروجی‌های شبیه‌سازی نتیجه گیری صورت می‌گیرد.



شکل ۱: روند کاهش قیمت تولید سیستم‌های فتوولتائیک

و قرار دادن آنها در الگوهای مشخص می‌باشد. به عبارت دیگر نگاهی تازه به اعوجاج‌های موجود در سیستم‌های قدرت به منزله مطلب جدیدی خود را نشان داده است که کنکاش در آن یکی از مهمترین موارد در مطالعه این سیستم‌ها به شمار می‌آید.

به طور کلی، تعریفی که می‌توان برای کیفیت توان بیان کرد عبارت است از: هرگونه مشکلی که باعث تغییر در ولتاژ، جریان یا فرکانس گردد و موجب خرابی و یا عملکرد نادرست تجهیزات مصرف‌کننده شود [۲].

بعضی از پدیده‌هایی که باعث مشکلات کیفیت توان می‌شوند عبارتند از [۳]: پدیده‌های گذرا، فلش و قطعی ولتاژ، تغییرات بلند مدت ولتاژ و تغییرات فرکانس، عدم تعادل ولتاژ، نوسان ولتاژ (فلیکر)، هارمونیکی‌ها.

یکی از مسائل و مشکلات کیفیت توان در سیستم‌های توزیع و انتقال، مسئله هارمونیکی‌ها می‌باشد. اعوجاج‌های هارمونیکی باعث ایجاد مشکلات خاصی در شبکه‌های قدرت می‌شوند. از جمله این مشکلات می‌توان به عدم عملکرد مناسب تجهیزات و نیز کاهش عمر و پایین آمدن راندمان دستگاه‌ها اشاره نمود. کنترل و محدود نمودن اعوجاج هارمونیکی هم از نظر شرکت‌های برق و هم از نظر مشترکین لازم می‌باشد. شرکت‌های برق باید محدودیت‌هایی را ارائه نمایند تا از آسیب دیدگی تجهیزات مشترکین، اعم از مشترکین خانگی و صنعتی جلوگیری به عمل آید. از طرف دیگر با توجه به اینکه ایجاد یک موج کاملاً سینوسی از طرف شرکت‌های برق نمی‌تواند تضمین شود، لذا مشترکین باید اعوجاج‌های تولید شده توسط تجهیزات خود را محدود کنند [۴].

تجهیزات الکترونیک قدرت لازمه اتصال منابع انرژی تجدیدپذیر به شبکه است که سیستم‌های فتوولتائیک نیز از این امر پیروی می‌کند. استفاده

۲. سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه

ساختار کلی یک سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه را می توان به صورت شکل ۲ نشان داد.

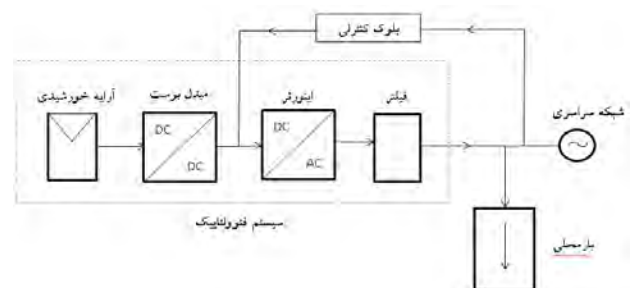
مشاهده می شود چنانچه سیستم فتوولتائیک وجود نداشته باشد، کل توان اکتیو و راکتیو بار توسط شبکه تامین می شود و چنانچه سیستم فتوولتائیک وجود داشته باشد، براساس میزان بار حالت های مختلف به وجود می آید. حالت اول اینکه تولید توان سیستم فتوولتائیک بیشتر از بار محلی باشد که در این صورت، اضافه توان تولیدی به شبکه تزریق می شود. حالت دوم اینکه تولید توان سیستم فتوولتائیک کمتر از بار محلی باشد که در این صورت، کمبود توان برای تامین بار از شبکه می آید.

در ادامه هر یک از قسمت های ساختار کلی یک سیستم فتوولتائیک را مورد بررسی قرار می دهیم.

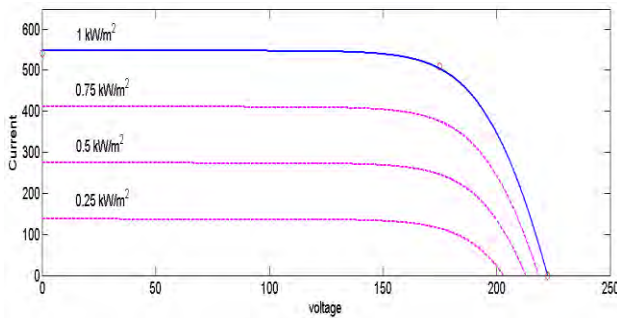
۲.۱. آرایه فتوولتائیک

عملکرد الکتریکی یک پنل فتوولتائیک را با مشخصه های جریان-ولتاژ آنها دسته بندی می کنند. در شکل ۳ کاملاً مشاهده می شود، با اضافه شدن ولتاژ خروجی تا مرز نقطه ماکزیمم توان، در یک سلول خورشیدی، جریان خروجی با شیب ملایمی کاهش می یابد. ولی با عبور ولتاژ از نقطه ماکزیمم توان، جریان با شیب تندی کاهش و به صفر میل می نماید.

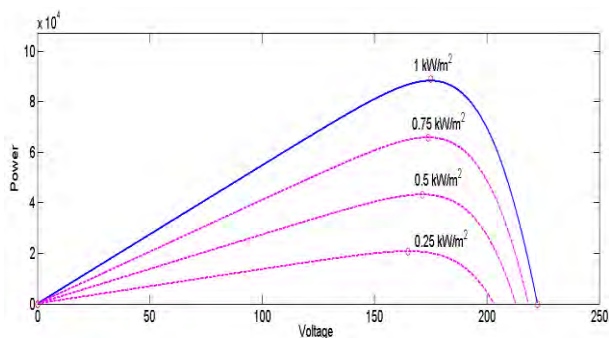
در برخی موارد برای تحلیل پنل فتوولتائیک از منحنی توان-ولتاژ شکل ۴ استفاده می کنند که البته شامل همان اطلاعات منحنی جریان-ولتاژ است. منحنی توان-ولتاژ توضیح روشن تری را از نحوه تاثیرپذیری توان خروجی از ولتاژ کاری ارائه کرده و نشان می دهد که بیشترین توان خروجی در چه سطحی از ولتاژ رخ می دهد.



شکل ۲: ساختار کلی یک سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه



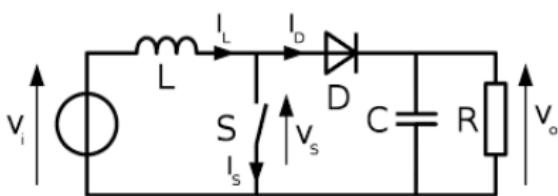
شکل ۳: مشخصه جریان-ولتاژ پنل فتوولتائیک



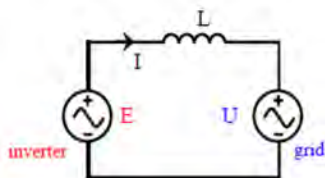
شکل ۴: مشخصه توان-ولتاژ پنل فتوولتائیک

۲.۲. مبدل بوست

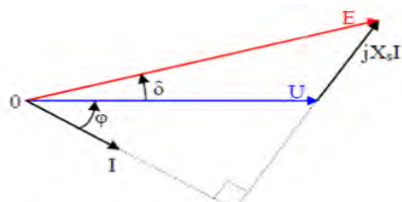
برای اینکه آرایه خورشیدی تحت شرایط مختلف بیشترین توان ممکن را تولید کند از یک مبدل DC/DC برای اتصال آرایه خورشیدی به اینورتر استفاده می کنند که به خوبی این مبدل در [۱۵، ۱۶] توضیح داده شده است. در این مبدل، ولتاژ خروجی همواره بزرگتر از ولتاژ ورودی خواهد بود. ساختار شماتیک این مبدل در شکل ۵ دیده می شود. از آنجا که اساس کار این مبدل ها سوئیچینگ است، برای از بین بردن ریپل موجود در ولتاژ خروجی از یک خازن استفاده می گردد و همچنین با استفاده از یک دیود، جریان خروجی رو یکسو می شود تا بارهای راکتیو بتوانند بدون مشکل تغذیه شوند.



شکل ۵: ساختار شماتیک مبدل بوست



شکل ۶: مدار معادل کلی یک اینورتر



شکل ۷: دیاگرام ولتاژ شبکه (U) و زاویه بار (δ)

برای کامل کردن توضیحات خصوصیات مدار و نحوه رفتار اجزای مختلف آن، دیاگرام برداری اجزای اصلی سیستم از جمله، ولتاژ خروجی اینورتر (E)، جریان خروجی اینورتر (I)، اندوکتانس $L(j\omega L = jX_s)$ و ولتاژ شبکه (U) در شکل ۶ نشان داده شده است. φ معرف زاویه بین ولتاژ شبکه و جریان خروجی اینورتر می‌باشد و δ معرف زاویه بین ولتاژ شبکه و ولتاژ خروجی اینورتر است.

با توجه به دیاگرام برداری شکل ۷ می‌توان روابط ۱ تا ۵ را بدست آورد:

$$E = U + jX_s I \quad (1)$$

$$E = |E|e^{j\delta} = |E| \cos(\delta) + j|E| \sin(\delta) \quad (2)$$

$$U = |U| \angle 0 \quad (3)$$

$$I = I \angle \varphi = |I| \cos \varphi + j|I| \sin \varphi \quad (4)$$

$$jX_s I = -X_s |I| \sin(\varphi) + jX_s |I| \cos(\varphi) \quad (5)$$

با توجه به روابط داریم:

$$|E| \sin(\delta) = X_s |I| \cos(\varphi) \quad (6)$$

توان اکتیو (P) و توان راکتیو تولیدی (Q) را می‌توان از رابطه‌های ۷ و ۸ بدست آورد:

سلف موجود در قسمت ورودی مدار، انرژی مورد نیاز خود را در هنگام بسته بودن کلید از ولتاژ ورودی دریافت و در هنگام باز شدن کلید، این انرژی را آزاد می‌سازد. در نتیجه در حالت پایدار، ولتاژ خروجی مقداری ثابت و بزرگتر از ورودی خواهد بود.

این مبدل بسته به جریانی که از سلف می‌گذرد، می‌تواند در سه حالت عمل کند [۱۷]:

- حالت پیوسته: زمانی که جریان سلف همواره بزرگتر از صفر باشد.
- حالت بحران: زمانی که جریان سلف فقط در یک لحظه صفر شود.
- حالت غیرپیوسته: زمانی که جریان سلف در یک بازه زمانی صفر شود.

۲.۳.۳. اینورتر

اینورترها عنصر کلیدی برای اتصال سیستم‌های توان فتوولتائیک به شبکه است. عملکرد اصلی اینورترها، تبدیل توان مستقیم تولیدی توسط پنل‌های خورشیدی به توان متناوب سنکرون با شبکه می‌باشد. اصولاً برای تنظیمات اتصال اینورتر به شبکه و استانداردهای مربوط به آن باید دو دسته مسائل عملکرد و طراحی را مد نظر قرار داد [۱۸].

در سطوح خانگی از سیستم فتوولتائیک تکفاز استفاده می‌شود. ولی اگر میزان تولید سیستم فتوولتائیک زیاد باشد، سیستم فتوولتائیک به صورت سه فاز به شبکه متصل می‌شود.

در راستای توسعه تکنولوژی اینورترهای فتوولتائیک، می‌توان اینورترهای فتوولتائیک را در دو خانواده بزرگ دسته‌بندی کرد که عبارتند از:

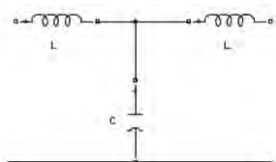
- H-bridge
- نقطه خنثی نگه داشته شده (NPC)^۱

که هر کدام از این خانواده‌ها دارای چندین نوع مختلف می‌باشند که در [۲۰] به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲.۳.۳.۱. توان خروجی اینورتر

شکل ۶، شماتیک اتصال اینورتر توسط یک سلف سری به شبکه را نشان می‌دهد.

^۱ Neutral point clamped



شکل ۸: ساختار فیلتر LCL

$$P = |U||I| \cos(\varphi) = \frac{|U||E|}{X_s} \sin(\delta) \quad (7)$$

$$Q = \frac{|U||E|}{X_s} \cos(\varphi) - \frac{U^2}{X_s} = \frac{|U|}{X_s} (|E| \cos(\delta) - |U|) \quad (8)$$

که در این روابط ω_{res} فرکانس تشدید، L سلف فیلتر، C خازن فیلتر، Q توان راکتیو مبادله شده با سیستم، V ولتاژ نامی سیستم، f_0 فرکانس خروجی سیستم، V_{in} ولتاژ ورودی از اینورتر، h مقدار ریپل جریان می باشد. بدیهی است برای کاهش اندازه فیلتر بایستی توسط استراتژی کنترل، هارمونیک ها به فرکانس های بالا انتقال داده شود تا فیلتر برای فرکانس قطع بالاتری طراحی گردد. در این صورت طبق روابط فوق نیاز به مقادیر L و C کوچکتری برای فیلتر خواهد بود و امکان پیاده سازی عملی آن وجود خواهد داشت.

۲.۵. استراتژی کنترل

برای کنترل سیستم فتوولتائیک دو نوع روش کنترلی، کنترل ولتاژ و کنترل جریان وجود دارد. ساختار کنترلی که در شبیه سازی این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است، استفاده از کنترل ولتاژ می باشد. در این روش با توجه به اینکه شبکه یک منبع ولتاژ تقریباً ثابت است از ولتاژ و جریان شبکه در هر لحظه نمونه برداری کرده و با استفاده از تئوری abc/dq ولتاژها و جریانها را بدست آورده و با ولتاژ و جریان مرجع مقایسه کرده و با استفاده از کلیدزنی مناسب اینورتر، ولتاژها و جریانهای مناسب را تولید می کند که نحوه تبدیل abc به dq در روابط ۱۲ و ۱۳ آورده شده است.

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (13)$$

۳. نتایج شبیه سازی

در این مقاله هارمونیک جریان در یک نیروگاه 100kW در شرایط مختلف عملکرد مورد تحلیل و بررسی قرار داده می شود. بلوک دیاگرام کلی

با توجه به روابط، کنترل توان با کنترل اندازه ولتاژ خروجی اینورتر (|E|) و زاویه بین ولتاژ خروجی اینورتر و ولتاژ شبکه (δ) انجام می گیرد. به عبارت دیگر برای تزریق توان به شبکه، مقدار ولتاژ DC باید به اندازه ای بزرگ باشد تا ولتاژ خروجی (E) بتواند مقداری برابر یا بزرگتر از مقدار ولتاژ پیک شبکه داشته باشد. توان اکتیو و توان راکتیو به ترتیب با اندازه ولتاژ خروجی اینورتر (|E|) و زاویه بار (δ) وابسته است. در نتیجه توان اکتیو تزریقی به شبکه می تواند با اختلاف فاز بین ولتاژ شبکه و ولتاژ خروجی اینورتر کنترل شود [۱۹].

۲.۴. فیلترگذاری

با توجه به تحقیقات و مطالعات انجام شده، فیلترگذاری به عنوان بهترین راه حل جبران سازی هارمونیک معرفی شده است. این فیلترها را می توان به دو دسته فیلترهای فعال و غیرفعال تقسیم بندی کرد. فیلترهای غیرفعال، متشکل از عناصر پسیو^۲ (مقاومت، سلف و خازن) هستند، در صورتی که فیلترهای فعال حالت اکتیو داشته و متشکل از اینورتر DC/AC با سلف کوپلینگ می باشند که ولتاژهای اکتیو تعیین شده توسط مدار کنترلی برای جبران سازی را در سر AC خروجی تولید می کنند. مرجع [۱۸] به طور کامل فیلترگذاری را مورد تحلیل قرار داده است. در این مقاله از فیلتر LCL استفاده شده است. ساختار فیلتر LCL در شکل ۸ نشان داده شده است.

برای محاسبه اندازه پارامترهای فیلتر LCL از روابط زیر استفاده می شود [۲۰]:

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{2}{LC}} \quad (9)$$

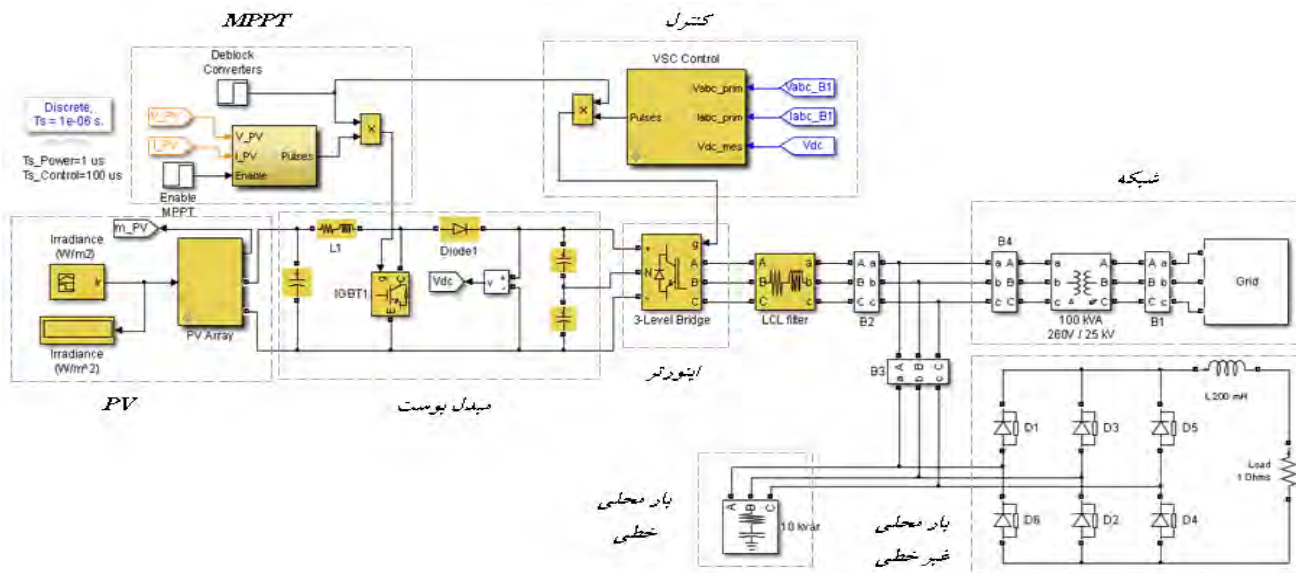
$$C = \frac{Q}{2\pi f_0 V^2} \quad (10)$$

$$L = \frac{V_{in}}{8h f_{res}} \quad (11)$$

² passive

بررسی هارمونیکی نیروگاه خورشیدی ۱۰۰kW متصل به شبکه

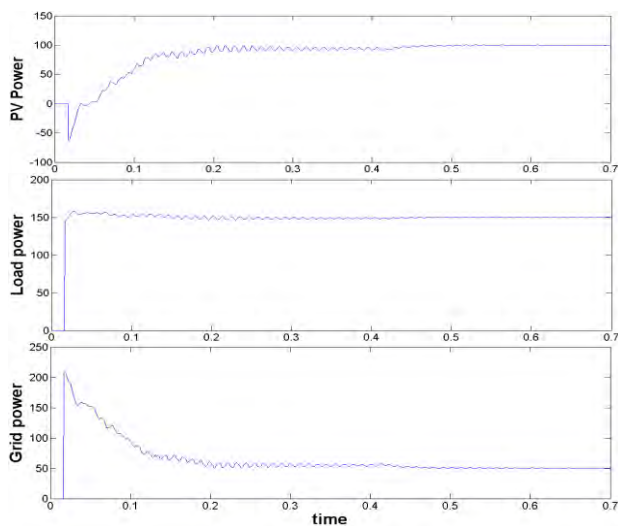
هفتمین کنفرانس مهندسی برق و الکترونیک ایران - ۱۳۹۴ دانشگاه آزاد اسلامی گناباد



شکل ۹: بلوک دیاگرام کلی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه

بدست می‌آید. نتایج آنالیز FFT اعوجاج هارمونیک جریان برای کل سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه در جدول ۱ آمده است.

مدل استفاده شده در این مقاله که در محیط سیمولینک نرم افزار MATLAB می‌باشد، در شکل ۹ آورده شده است.



شکل ۱۰: توان اکتیو بخش‌های مختلف در حالت اول

جدول ۱: آنالیز FFT جریان در حالت اول

اعوجاج هارمونیکی کل	مرتبه هارمونیک			
	مرتبه ۷	مرتبه ۵	مرتبه ۳	
سیستم فتوولتائیک	۰	۰,۰۳	۰,۱۰	
بار خطی	۰	۰,۰۱	۰,۰۲	
شبکه	۰,۰۱	۰,۰۴	۰,۱۶	
جریان				۰,۲۸

پارامترهای مورد استفاده در این شبیه‌سازی عبارتند از: فرکانس ۶۰ هرتز، ولتاژ فاز به نول شبکه ۲۲۰ ولت، ولتاژ مرجع خازن dc ورودی ۵۰۰ ولت، ظرفیت خازن ورودی ۱۰۰ میکرو فاراد و سلف اتصال به شبکه برابر ۲۵۰ میکروهنری.

۳,۱,۱. تاثیر نوع و میزان بار محلی

سیستم مورد مطالعه را در دو حالت بار محلی خطی و بار محلی غیرخطی مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. برای هر یک از این دو حالت، میزان بار محلی را یکبار بیشتر از توان تولیدی سیستم فتوولتائیک و یکبار کمتر در نظر می‌گیریم.

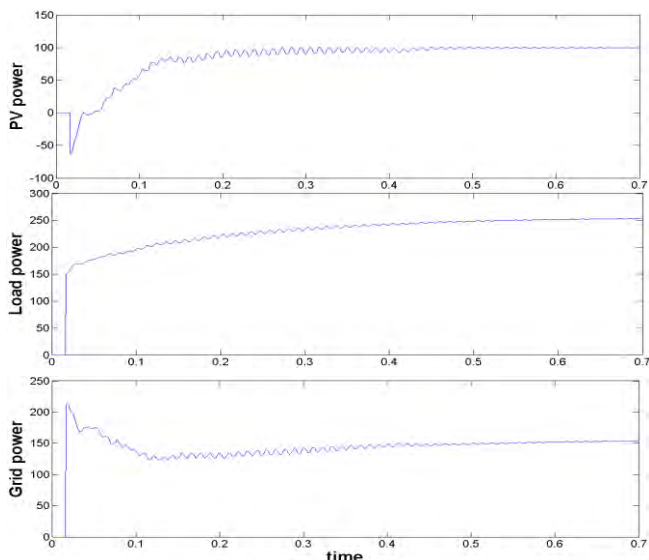
باید خاطر نشان کرد برای آنکه شرایط یکسانی برای مقایسه سیستم فتوولتائیک حکم فرما باشد، در کلیه حالت‌ها تابش سیستم فتوولتائیک ثابت در نظر گرفته شده است.

۳,۱,۱,۱. بار محلی خطی

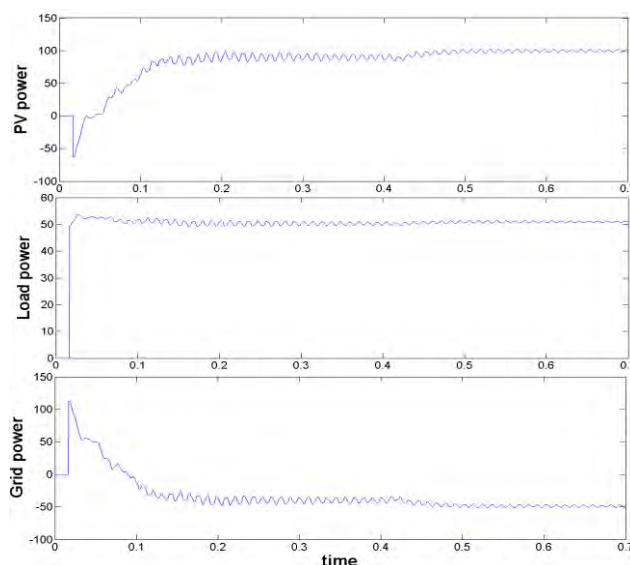
در حالت اول که توان تولیدی سیستم فتوولتائیک کمتر از بار محلی خطی می‌باشد، نمودار تغییرات توان در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود کمبود توان برای تامین بار محلی از شبکه

بررسی هارمونیکی نیروگاه خورشیدی ۱۰۰kw متصل به شبکه

هفتمین کنفرانس مهندسی برق و الکترونیک ایران - ۱۳۹۴ دانشگاه آزاد اسلامی گناباد



شکل ۱۲: توان اکتیو بخش‌های مختلف در حالت سوم



شکل ۱۱: توان اکتیو بخش‌های مختلف در حالت دوم

جدول ۳: آنالیز FFT جریان برای حالت سوم

اعوجاج هارمونیکی کل	مرتب‌ه هارمونیکی			
	مرتب‌ه ۷	مرتب‌ه ۵	مرتب‌ه ۳	
جریان	۲,۶۱	۱,۲۳	۰,۰۶	سیستم فتوولتائیک
بار غیرخطی	۹,۱۵	۴,۶۲	۰,۰۱	بار غیرخطی
شبکه	۱۳,۱۷	۶,۶۹	۰,۰۵	شبکه

جدول ۲: آنالیز FFT جریان برای حالت دوم

اعوجاج هارمونیکی کل	مرتب‌ه هارمونیکی			
	مرتب‌ه ۷	مرتب‌ه ۵	مرتب‌ه ۳	
جریان	۱,۴۵	۰,۱۶	۰,۲۳	سیستم فتوولتائیک
بار خطی	۰,۶۹	۰,۰۱	۰,۰۱	بار خطی
شبکه	۲,۱۶	۰,۲۳	۰,۳۴	شبکه

نمودار تغییرات توان برای حالت چهارم که توان تولیدی سیستم فتوولتائیک بیشتر از بار محلی غیرخطی می باشد، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. اعوجاج هارمونیکی جریان برای کل سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه در جدول ۴ آمده است.

با مقایسه جدول‌های ۳ و ۴، زمانی که توان تولیدی سیستم فتوولتائیک از بار محلی غیرخطی بیشتر است، اعوجاج هارمونیکی جریان سیستم فتوولتائیک افزایش ولی بار غیرخطی و شبکه کاهش می یابد.

جدول ۴: آنالیز FFT جریان برای حالت چهارم

اعوجاج هارمونیکی کل	مرتب‌ه هارمونیکی			
	مرتب‌ه ۷	مرتب‌ه ۵	مرتب‌ه ۳	
جریان	۳,۶۶	۰,۱۲	۰,۸۳	سیستم فتوولتائیک
بار غیرخطی	۵,۴۱	۲,۶۸	۰,۱۰	بار غیرخطی
شبکه	۷,۵۷	۲,۴۷	۱,۳۸	شبکه

در حالت دوم توان تولیدی سیستم فتوولتائیک بیشتر از بار محلی خطی می باشد، نمودار تغییرات توان در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود اضافه توان تولیدی سیستم فتوولتائیک به شبکه تزریق می شود. نتایج آنالیز FFT اعوجاج هارمونیکی جریان برای کل سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه در جدول ۲ آمده است.

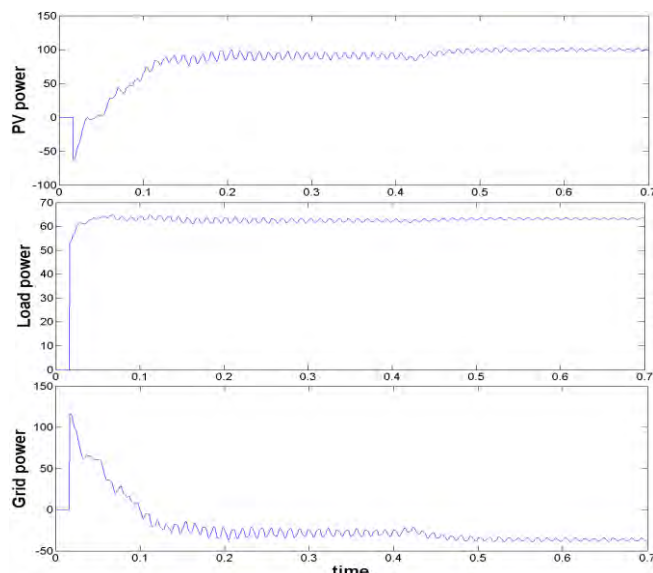
با مقایسه جدول‌های ۱ و ۲ مشاهده می شود، زمانی که توان تولیدی سیستم فتوولتائیک از بار محلی خطی بیشتر است، اعوجاج هارمونیکی جریان تمام بخش‌های سیستم افزایش می یابد.

۳,۱,۲ بار محلی غیرخطی

در این بخش در کنار بار خطی، یک بار غیرخطی توسط یکسوکنده سه فاز قرار داده شده است. در حالت سوم توان تولیدی سیستم فتوولتائیک کمتر از مجموع بار محلی خطی و غیرخطی می باشد، نمودار تغییرات توان در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج آنالیز FFT اعوجاج هارمونیکی جریان برای کل سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه در جدول ۳ آمده است.

منابع

- [1] www.renewconomy.com.au
- [2] Yang Du, Dylan Dah-Chuan Lu, Geoffrey James, David J. Cornforth, "Modeling and analysis of current harmonic distortion from grid connected PV inverters under different operating conditions", Solar Energy 94 (2013), pp.182-194.
- [3] R. C. Duagan, M. F. Mcgranaghan and H. W. Beaty, "Electric Power System Quality", McGraw-Hill, 1221 Avenue of the Americas, New York, NY 1002.
- [4] مهدی باقری، رضا مهری، کیفیت توان و اثرات آن بر تجهیزات فشار قوی، چاپ اول ۱۳۸۹.
- [5] H. Bin, Q. Hua, H. Cui, "A technique for FFT harmonics compensation and leakage current suppression in 10kW PV inverter", 2012 IEEE 7th international power electronics and motion control conference-ECCE Asia, June 2-5, 2012, Harbin, China.
- [6] S. Patthamakunchai, M. Konghirun, W. Lenwari, "An Anti-Islanding for Multiple Photovoltaic Inverters using Harmonic Current Injections", Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2012 9th International Conference on, IEEE, 16-18 May 2012.
- [7] M. Ahmad, B. H. Khan, "Comparison and Simulation of Two New Schemes in Solar Inverters for Harmonic Reduction", Power India Conference, 2012 IEEE Fifth, pp.1-6, 19-22 Dec. 2012.
- [8] J. Schlabbach, A. Groß, "Harmonic Current Emission of PV-Generation under Controlled Voltage Conditions", Electrotechnical Conference, 2006. MELECON 2006. IEEE Mediterranean, pp.1056-1059, 16-19 May 2006.
- [9] I. Bhattacharya, Y. Deng, S. Y. Foo, "Active Filters for Harmonics Elimination in Solar Photovoltaic Grid-Connected and Stand-Alone Systems", Quality Electronic Design (ASQED), 2010 2nd Asia Symposium on, IEEE, pp.280-284, 3-4 Aug. 2010.
- [10] M. Sidrach-de-Cardona, J. Carretero, "Analysis of the current total harmonic distortion for different single-phase inverters for grid-connected pv-systems", Solar Energy Materials & Solar Cells 87 (2005), pp.529-540.
- [11] Z. Xiangyang, L. Shiyang, "A research of harmonics for multiple PV inverters in grid-connected", Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, IEEE, pp.1-4, 27-29 March 2012.
- [12] D. Gallo, R. Langella, A. Testa, J. C. Hernandez, I. Papic, B. Blazic, J. Meyer, "Case Studies on Large PV Plants: Harmonic Distortion, Unbalance and their Effects", Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE, 21-25 July 2013.
- [13] T. Ito, H. Miyata, M. Taniguchi, T. Aihara, N. Uchiyama, and H. Konishi, "Harmonic current reduction control for grid-connected PV generation systems", Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International, IEEE, pp.1695-1700, 21-24 June 2010.
- [14] A. Mesemanolis, D. Pontikidis, C. Demoulias, "A New Modulation Technique for Reduced Harmonic Distortion of Current in PV Inverters", EUROCON - International Conference on Computer as a Tool (EUROCON), 2011 IEEE, 27-29 April 2011.
- [15] Z. Sallameh and D. Taylor, "step-up maximum power point Tracking for photovoltaic Arrays", solar Energy, vol. 44, No.1, P.57, 1990.
- [16] H. Sugimoto and H. Dong, "A New scheme for maximum photovoltaic power tracking control" IEEE, 1997.
- [17] Robbins. Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P, "Power electronics: converters, applications, and design (2 ed.)", New York [u.a.], 1995, Wiley, p. 172, ISBN 0471584088.
- [18] B. Yang, W. Li, Member, Y. Gu, W. Cui, and X. He, "Improved Transformerless Inverter With Common-Mode Leakage Current Elimination for a Photovoltaic Grid-Connected Power System".
- [19] T. C. Binh, M. T. Dat, N. M. Dung, P. Quang, P. Dinh, N. H. Phuc, "active and reactive power controller for single-phase grid-connected photovoltaic systems", Department of electrical-electronics engineering-HoChiMinh City University of technology.
- [20] M. Jayaraman, Sreedevi V. T, R. Balakrishnan, "Analysis and design of passive filters for power wuality improvement in standalone PV systems.



شکل ۱۳: توان اکتیو بخش‌های مختلف در حالت چهارم

مشاهده می‌شود که در حالت بار خطی هارمونیک‌های جریان در تمام بخش‌های سیستم کم است. به عبارت دیگر سیستم فتوولتائیک توانسته است یک جریان نسبتاً سینوسی تولید کند. ولی در حالتی که بار دارای ماهیت غیر خطی نیز هست، جریان در تمام بخش‌ها دارای اعوجاج هارمونیک می‌شود. البته سهم فتوولتائیک به دلیل استراتژی کنترل و جبران‌سازی با فیلتر کمتر از شبکه است.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله اعوجاج هارمونیک جریان برای یک سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه در شرایط بارهای مختلف مورد آنالیز قرار گرفت. در حالت بار خطی مشاهده گردید که مقادیر اعوجاج هارمونیک پایین است، هرچند در حالتی که بار خطی از توان تولیدی فتوولتائیک کمتر است مقدار اعوجاج کمی بیشتر می‌شود. در صورت وجود بخش غیرخطی در بار، جریان کشیده شده از بار دارای اعوجاج می‌شود که بایستی این اعوجاج توسط فتوولتائیک و شبکه تامین گردد. نتایج نشان می‌دهد که شبکه سهم بیشتری در تامین اعوجاج جریان بار دارد که دلیل این موضوع به تدابیر کنترلی در اینورتر فتوولتائیک جهت تولید جریان سینوسی برمی‌گردد. برای کاهش اعوجاج در نقطه اتصال به شبکه می‌توان اینورتر فتوولتائیک را به صورت فیلتر اکتیو نیز کنترل نمود.