





دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی

کنترل توان راکتیو در سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه تک فاز

سعید متداولی رودی

استاد راهنما :

دکتر علی دستفان

تابستان

۱۳۹۷

تقدیر برپدرم

کوهی استوار و حامی من در طول تمام زندگی

و

تقدیر برمادرم

سنگ صبوری که الفبای زندگی به من آموخت

تقدیر و تشکر:

«من لیشکر المخلوق لیشکر الخالق»

منت خدای را عز و جل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت. هر نفسی که فرو می‌رود ممد حیات است و چون برمی‌آید مفرح ذات. پس در هر نفسی دو نعمت موجود است و بر هر نعمتی شکری واجب.

با سلام و صلوات بر پیامبر اعظم حضرت محمد مصطفی (ص) و خاندان پاکش و با سپاس و حمد بی همتای خداوند متعال که انسان را خلق کرد و به وسیله قلم، تعلیم نمود و به انسان آنچه را که نمی‌دانست آموخت.

حال که به یاری و نصرت حضرت حق تعالی، این پایان‌نامه به اتمام رسیده است، بر خود واجب دانستم تا از تلاش صادقانه و خستگی‌ناپذیر استاد ارجمند، جناب آقای دکتر علی دستفان که به‌عنوان استاد راهنما در جهت هدایت و راهبری این پایان‌نامه متحمل زحمات زیاد شدند و با پیگیری‌های مسئولانه خویش موجب تکمیل این پایان‌نامه گردیدند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

درنهایت مراتب تشکر صمیمانه خود را به اعضاء خانواده‌ام که در طول دوران تحصیل و در مدت تهیه پایان‌نامه مشکلات و سختی‌های گوناگونی را با آغوش باز پذیرا شدند و محیطی آرام را رقم زدند، ابراز می‌کنم.

این قلم و ام‌دار خیل این عزیزان بزرگوار است و از درگاه خداوند سبحان برای تمامی این عزیزان آرزوی موفقیت و سلامتی روزافزون خواستارم.

سعید متداولی رودی

تعهد نامه

اینجانب سعید متداولی رودی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه «کنترل توان راکتیو در سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه تک فاز» تحت راهنمایی دکتر علی دستفان متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا چینی جاهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو :

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

در این پایان نامه، هدف طراحی یک سامانه فتوولتائیک تک فاز متصل به شبکه برای مصارف مسکونی است که علاوه بر تزریق توان اکتیو به شبکه، توانایی کنترل توان راکتیو را نیز دارد. به منظور طراحی این سامانه، سه مقوله اینورتر و روش کلیدزنی آن، سیستم کنترل و استراتژی کنترل توان راکتیو مورد توجه قرار گرفته اند. اینورتر به کاررفته در این سامانه، از نوع HERIC است که به کمک روش کلیدزنی تک قطبی عملکرد بهتری نسبت به ساختار رایج تمام پل ارائه می کند. سیستم کنترل سامانه فتوولتائیک به گونه ای طراحی شده است که ضمن عملکرد بهینه سامانه، قابلیت کنترل توان راکتیو را نیز داشته باشد. از آنجاکه سامانه فتوولتائیک طراحی شده قادر به کنترل توان راکتیو است، یک استراتژی پیشنهادی برای کنترل توان راکتیو با توجه به ولتاژ سامانه در نقطه اتصال در هنگام وقوع خطا در شبکه ارائه شده است. در نهایت صحت عملکرد سامانه فتوولتائیک طراحی شده، به کمک شبیه سازی در محیط Simulink نرم افزار MATLAB نشان داده شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد سامانه فتوولتائیک طراحی شده به همراه استراتژی کنترل توان راکتیو ارائه شده قادر است علاوه بر تزریق توان اکتیو به شبکه، به جبران سازی ولتاژ شبکه در صورت وقوع خطا نیز پردازد.

کلمات کلیدی: سامانه فتوولتائیک، سامانه PV، توان راکتیو، کنترل توان راکتیو در سامانه

فتوولتائیک، طراحی سامانه فتوولتائیک

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

- س. متداولی و ع. دستفان، "بررسی عملکرد ساختارهای متفاوت اینورتر در سامانه فتوولتائیک تکفاز متصل به شبکه"، ششمین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران، تبریز، ۱۳۹۶.

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱ پیشگفتار	۲
۲-۱ هدف پژوهش	۴
۳-۱ مروری بر فصول پایان نامه	۴
فصل ۲: مروری بر سامانه‌های فتوولتائیک و کنترل آن‌ها	۷
۱-۲ مقدمه	۸
۲-۲ قوانین اتصال سامانه فتوولتائیک به شبکه	۸
۱-۲-۲ هارمونیک‌ها و اعوجاج شکل موج	۹
۲-۲-۲ اضافه/کمبود ولتاژ	۹
۳-۲-۲ اضافه/کمبود فرکانس	۱۰
۳-۲ انرژی خورشید	۱۰
۴-۲ پنل‌های خورشیدی	۱۲
۱-۴-۲ انواع مختلف پنل خورشیدی	۱۲
۲-۴-۲ مدل پنل خورشیدی و مشخصه‌های آن	۱۴
۵-۲ مروری بر مبانی و سیر تحول سامانه فتوولتائیک	۱۷
۱-۵-۲ مجموعه پنل‌های خورشیدی	۱۸
۲-۵-۲ مبدل DC/DC	۲۰
۳-۵-۲ خازن لینک DC	۲۲
۴-۵-۲ اینورتر و روش‌های کلیدزنی آن	۲۴
۵-۵-۲ روش‌های ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT)	۳۲
۶-۵-۲ کنترل اینورتر	۳۶
۷-۵-۲ تضعیف هارمونیک‌های جریان خروجی اینورتر	۴۰
۶-۲ کنترل توان راکتیو	۴۳
۱-۶-۲ تعیین توان راکتیو مرجع توسط مرکز کنترل	۴۶
۲-۶-۲ تعیین توان راکتیو مرجع با توجه به ولتاژ شبکه در نقطه PCC	۴۷

۷-۲	جمع‌بندی	۵۴
فصل ۳: طراحی سامانه فتوولتائیک		
۱-۳	مقدمه	۵۶
۲-۳	توان نامی سامانه فتوولتائیک	۵۷
۳-۳	خازن لینک DC	۵۸
۴-۳	مبدل بوست و روش کنترل آن	۵۹
۵-۳	اینورتر و نحوه کلیدزنی آن	۶۰
۶-۳	طراحی فیلتر LCL	۶۰
۷-۳	کنترل‌کننده اینورتر	۶۳
۱-۷-۳	کنترل‌کننده جریان	۶۳
۱-۱-۷-۳	مدل‌سازی سیستم	۶۴
۲-۱-۷-۳	جبران ساز حلقه جریان	۶۵
۲-۷-۳	تضعیف هارمونیک‌های فرد در حلقه جریان	۷۱
۳-۷-۳	کنترل‌کننده توان اکتیو و راکتیو	۷۱
۴-۷-۳	سنکرون‌ساز با شبکه	۷۶
۸-۳	کنترل توان راکتیو	۸۱
۹-۳	جمع‌بندی	۸۵
فصل ۴: شبیه‌سازی و نتایج		
۱-۴	مقدمه	۸۸
۲-۴	ارزیابی عملکرد اجزای مختلف سامانه فتوولتائیک	۸۹
۳-۴	عملکرد سامانه فتوولتائیک در ضریب توان واحد	۹۱
۱-۳-۴	عملکرد سامانه در هنگام تغییر تابش نور خورشید	۹۳
۲-۳-۴	عملکرد سامانه در هنگام تغییر دمای محیط	۹۵
۳-۳-۴	عملکرد سامانه با تغییر توان اکتیو مرجع	۹۷
۴-۴	عملکرد سامانه فتوولتائیک در کنترل توان راکتیو	۹۸
۱-۴-۴	تزریق توان راکتیو در صورت وقوع افت ولتاژ و یا فلش ولتاژی	۱۰۲
۲-۴-۴	تزریق توان راکتیو در صورت وقوع اضافه‌ولتاژ	۱۰۸

۱۱۲ جمع‌بندی ۵-۴
۱۱۳ فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۱۴ ۱-۵ نتیجه‌گیری
۱۱۵ ۲-۵ پیشنهادات
۱۱۷ مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) رشد جهانی ظرفیت مولدهای فتوولتائیک بر اساس تخمین IEA [۲]..... ۳
- شکل (۲-۱) قیمت متوسط پنل‌های خورشیدی به ازای هر وات در طول سال‌های اخیر بر اساس گزارش سالانه سازمان EIA آمریکا [۳]..... ۳
- شکل (۱-۲) پتانسیل تابش خورشیدی در ایران [۵]..... ۱۱
- شکل (۲-۲) مدار معادل یک سلول خورشیدی ایده‌آل..... ۱۴
- شکل (۳-۲) مشخصه‌های سلول خورشیدی [۴]..... ۱۵
- شکل (۴-۲) تأثیر میزان نور خورشید و دما بر روی مشخصه‌های سلول خورشیدی [۹]..... ۱۶
- شکل (۵-۲) مدار معادل یک سلول خورشیدی غیر ایده‌آل..... ۱۶
- شکل (۶-۲) تأثیر المان‌های مدل غیر ایده‌آل سلول خورشیدی بر روی مشخصه جریان-ولتاژ (I-V) [۴]..... ۱۷
- شکل (۷-۲) شمای کلی سامانه فتوولتائیک..... ۱۸
- شکل (۸-۲) مروری بر سیر تحول سامانه فتوولتائیک..... ۱۹
- شکل (۹-۲) شمای کلی مبدل بوست..... ۲۱
- شکل (۱۰-۲) توان لحظه‌ای AC..... ۲۳
- شکل (۱۱-۲) ساختارهای مختلف اینورتری..... ۲۶
- شکل (۱۲-۲) نحوه کنترل کلیدها در اینورترهای مختلف..... ۲۷
- شکل (۱۳-۲) جریان نشتی سامانه فتوولتائیک با بهره‌گیری از اینورترها و روش‌های کلیدزنی مختلف [۲۲]..... ۲۸
- شکل (۱۴-۲) نحوه کلیدزنی کلیدهای مختلف اینورتر هریک [۱]..... ۲۹
- شکل (۱۵-۲) عملکرد اینورتر هریک در ناحیه ۱ [۱]..... ۳۰
- شکل (۱۶-۲) عملکرد اینورتر هریک در ناحیه ۲ [۱]..... ۳۰
- شکل (۱۷-۲) عملکرد اینورتر هریک در ناحیه ۳ [۱]..... ۳۱
- شکل (۱۸-۲) عملکرد اینورتر هریک در ناحیه ۴ [۱]..... ۳۱
- شکل (۱۹-۲) ساخت سیگنال کلیدزنی از سیگنال مرجع تولیدشده توسط سیستم کنترل..... ۳۲
- شکل (۲۰-۲) الگوریتم P&O [۲۵]..... ۳۵

- شکل (۲-۲۱) الگوریتم IC [۲۵]..... ۳۶
- شکل (۲-۲۲) بلوک دیاگرام یک PLL با استفاده از روش شناسایی گذر از صفر [۲۸]..... ۳۸
- شکل (۲-۲۳) PLL پیشنهادی در مرجع [۲۹]..... ۳۹
- شکل (۲-۲۴) PLL ارائه شده در مرجع [۳۰] بر اساس دستگاه مرجع دوار ۳۹
- شکل (۲-۲۵) انواع مختلف فیلتر جهت تضعیف هارمونیک‌های فرکانس بالای جریان..... ۴۰
- شکل (۲-۲۶) الگوریتم طراحی فیلتر LCL [۳۱]..... ۴۲
- شکل (۲-۲۷) شمایی از تمرکز بالای سامانه‌های فتوولتائیک در شبکه توزیع..... ۴۵
- شکل (۲-۲۸) تأثیر توان خروجی سامانه PV بر روی ولتاژ شبکه [۳۳]..... ۴۵
- شکل (۲-۲۹) نحوه رفتار مولدهای تولید پراکنده متصل به شبکه در کشورهای مختلف در صورت وقوع فلش ولتاژ [۳۴]..... ۴۸
- شکل (۲-۳۰) استراتژی توان اکتیو متوسط ثابت برای تعیین میزان توان مرجع اکتیو و راکتیو [۳۴]..... ۴۹
- شکل (۲-۳۱) استراتژی جریان اکتیو ثابت برای تعیین میزان توان مرجع اکتیو و راکتیو [۳۴]..... ۵۱
- شکل (۲-۳۲) استراتژی پیک جریان ثابت برای تعیین میزان توان مرجع اکتیو و راکتیو [۳۴]..... ۵۲
- شکل (۲-۳۳) خروجی سامانه فتوولتائیک با ساختار اینورتری هریک در صورت بروز فلش ولتاژ [۳۴]..... ۵۳
- شکل (۳-۱) شمای کلی سامانه فتوولتائیک..... ۵۶
- شکل (۳-۲) فیلتر LCL..... ۶۱
- شکل (۳-۳) پاسخ فرکانسی تابع تبدیل فیلتر LCL در حضور و عدم حضور مقاومت میرا کننده R_d ۶۲
- شکل (۳-۴) شمای کلی سیستم کنترل اینورتر سامانه PV..... ۶۳
- شکل (۳-۵) بلوک دیاگرام کنترل کننده جریان..... ۶۵
- شکل (۳-۶) پاسخ فرکانسی جبران ساز PR ایده آل..... ۶۷
- شکل (۳-۷) پاسخ فرکانسی تابع حلقه بسته کنترل کننده به ازای Kp های مختلف..... ۶۸
- شکل (۳-۸) پاسخ فرکانسی تابع حلقه بسته کنترل کننده به ازای Kr های مختلف..... ۶۸
- شکل (۳-۹) پاسخ فرکانسی تابع حلقه بسته کنترل کننده به ازای ξ های مختلف..... ۶۹
- شکل (۳-۱۰) پاسخ فرکانسی تابع حلقه بسته کنترل کننده جریان با توجه به مقادیر جدول (۴-۳)..... ۷۰
- شکل (۳-۱۱) دنبال کردن سیگنال مرجع در حضور و عدم حضور جبران ساز PR..... ۷۰

- شکل (۳-۱۲) بلوک دیاگرام کنترل کننده های توان..... ۷۲
- شکل (۳-۱۳) الف) رابطه بین مقدار پیک جریان و مؤلفه های اکتیو و راکتیو آن ب) شکل موج های ولتاژ شبکه و جریان تزریق شده به آن [۴۳]..... ۷۴
- شکل (۳-۱۴) کنترل کننده توان اکتیو و راکتیو..... ۷۶
- شکل (۳-۱۵) دیاگرام فازوری vg ، $vg\alpha$ و $vg\beta$ ۷۷
- شکل (۳-۱۶) پاسخ فرکانسی $Vg(s)Vg\alpha(s)$ به ازای Kp های مختلف..... ۷۸
- شکل (۳-۱۷) پاسخ فرکانسی $Vg(s)Vg\beta(s)$ به ازای Kp های مختلف..... ۷۸
- شکل (۳-۱۸) خروجی SOGI: مؤلفه موازی با ولتاژ شبکه به ازای Kp های مختلف..... ۷۹
- شکل (۳-۱۹) بلوک دیاگرام سنکرون ساز [۳۰]..... ۸۰
- شکل (۳-۲۰) خروجی SOGI: مؤلفه موازی و عمودی ولتاژ شبکه به همراه تخمین دامنه..... ۸۱
- شکل (۴-۱) سامانه فتوولتائیک..... ۸۸
- شکل (۴-۲) ولتاژ لینک DC..... ۸۹
- شکل (۴-۳) جریان خروجی اینورتر بدون تضعیف کننده هارمونیک سوم..... ۹۰
- شکل (۴-۴) جریان خروجی اینورتر در حضور تضعیف کننده هارمونیک سوم..... ۹۰
- شکل (۴-۵) جریان خروجی سامانه فتوولتائیک پس از عبور از فیلتر LCL..... ۹۱
- شکل (۴-۶) خروجی سامانه فتوولتائیک در ضریب توان واحد الف) ولتاژ در نقطه اتصال مشترک (V) و جریان خروجی ($10 \times A$) ب) توان اکتیو خروجی سامانه ج) توان راکتیو خروجی سامانه..... ۹۲
- شکل (۴-۷) میزان تابش نور خورشید اعمال شده به سامانه فتوولتائیک..... ۹۳
- شکل (۴-۸) عملکرد سامانه فتوولتائیک در هنگام تغییر تابش نور خورشید..... ۹۴
- شکل (۴-۹) میزان دمای محیط اعمال شده به سامانه فتوولتائیک..... ۹۵
- شکل (۴-۱۰) عملکرد سامانه فتوولتائیک در هنگام تغییر دمای محیط..... ۹۶
- شکل (۴-۱۱) خروجی سامانه فتوولتائیک با تغییر توان اکتیو مرجع: توان اکتیو مرجع (W)، توان اکتیو خروجی (W) و توان راکتیو خروجی (Var)..... ۹۷
- شکل (۴-۱۲) توان اکتیو (W) و توان راکتیو (Var) خروجی سامانه فتوولتائیک به ازای اعمال ۲/۱ کیلوواتر به عنوان توان راکتیو مرجع به سیستم کنترل..... ۹۸
- شکل (۴-۱۳) ولتاژ شبکه در نقطه اتصال مشترک (V) و جریان خروجی سامانه فتوولتائیک ($10 \times A$) به ازای اعمال ۲/۱ کیلوواتر به عنوان توان راکتیو مرجع به سیستم کنترل..... ۹۹

- شکل (۴-۱۴) میزان هارمونیک‌های جریان خروجی سامانه فتوولتائیک هنگام تزریق ۲/۱ کیلووار توان راکتیو به شبکه..... ۹۹
- شکل (۴-۱۵) توان اکتیو (W) و توان راکتیو (Var) خروجی سامانه فتوولتائیک به ازای اعمال ۲/۱- کیلووار به‌عنوان توان راکتیو مرجع به سیستم کنترل..... ۱۰۰
- شکل (۴-۱۶) ولتاژ شبکه در نقطه اتصال مشترک (V) و جریان خروجی سامانه فتوولتائیک ($10 \times A$) به ازای اعمال ۲/۱- کیلووار به‌عنوان توان راکتیو مرجع به سیستم کنترل..... ۱۰۱
- شکل (۴-۱۷) میزان هارمونیک‌های جریان خروجی سامانه فتوولتائیک هنگام مصرف ۲/۱ کیلووار توان راکتیو از شبکه..... ۱۰۱
- شکل (۴-۱۸) خروجی سامانه فتوولتائیک در حالت عادی عملکردی پس از جبران‌سازی..... ۱۰۳
- شکل (۴-۱۹) خروجی سامانه فتوولتائیک در صورت بروز فلش ولتاژ با اضافه شدن بار ۱/۵ کیلوواری پس از جبران‌سازی ۱۰۴
- شکل (۴-۲۰) خروجی سامانه فتوولتائیک در صورت بروز فلش ولتاژ با اضافه شدن بار ۳ کیلوواری پس از جبران‌سازی ۱۰۵
- شکل (۴-۲۱) خروجی سامانه فتوولتائیک در صورت بروز فلش ولتاژ با اضافه شدن بار ۶ کیلوواری پس از جبران‌سازی ۱۰۶
- شکل (۴-۲۲) خروجی سامانه فتوولتائیک در صورت بروز اضافه ولتاژ ۲/۳ درصدی پس از جبران‌سازی..... ۱۰۹
- شکل (۴-۲۳) خروجی سامانه فتوولتائیک در صورت بروز اضافه ولتاژ ۴/۶ درصدی پس از جبران‌سازی..... ۱۱۰
- شکل (۴-۲۴) خروجی سامانه فتوولتائیک در صورت بروز اضافه ولتاژ ۱۰ درصدی پس از جبران‌سازی..... ۱۱۱

فهرست جداول

- جدول (۱-۲) حدود اعوجاج جریان خروجی سامانه فتوولتائیک [۶]..... ۹
- جدول (۲-۲) پاسخ سامانه فتوولتائیک به ولتاژ غیرعادی [۶]..... ۱۰
- جدول (۳-۲) مقایسه انواع مختلف پنل خورشیدی [۸]..... ۱۳
- جدول (۱-۳) مشخصات پنل TSM-250PD05 ساخت شرکت Trina..... ۵۸
- جدول (۲-۳) پارامترهای سامانه فتوولتائیک و شبکه‌ای که به آن متصل می‌شود..... ۵۸
- جدول (۳-۳) پارامترهای طراحی شده فیلتر LCL..... ۶۲
- جدول (۴-۳) پارامترهای طراحی شده جبران ساز PR..... ۷۰
- جدول (۵-۳) پارامترهای طراحی شده سامانه PV..... ۸۶
- جدول (۱-۴) خروجی سامانه فتوولتائیک در صورت وقوع افت ولتاژ و یا فلش ولتاژی در شبکه..... ۱۰۷
- جدول (۲-۴) خروجی سامانه فتوولتائیک در صورت وقوع اضافه ولتاژ در شبکه..... ۱۱۲



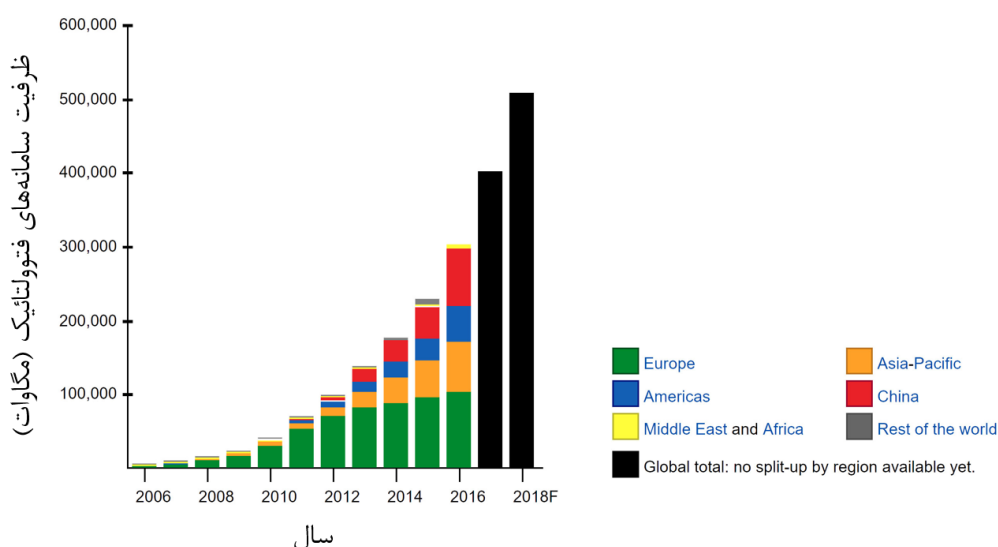
فصلا

مقدم



۱-۱ پیشگفتار

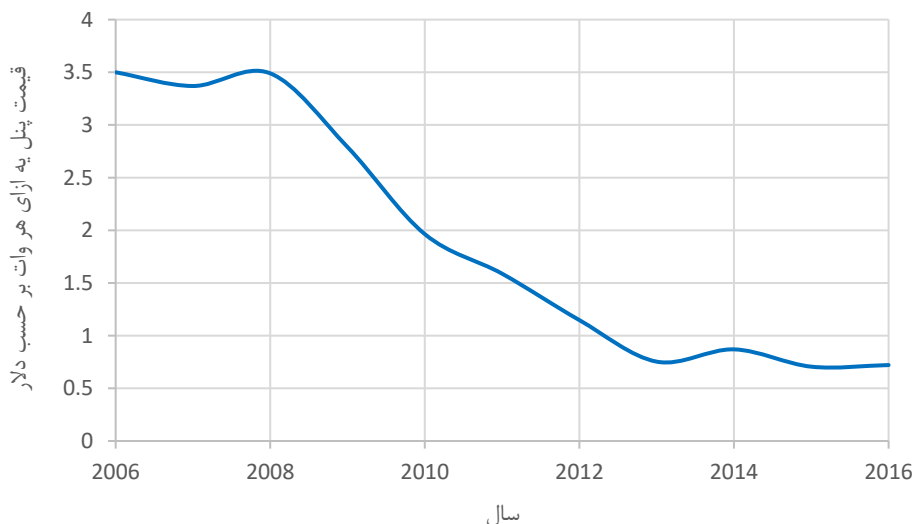
در حال حاضر نیروگاه‌های فسیلی بخش عظیمی از انرژی الکتریکی در جهان را تأمین می‌کنند اما تجدید ناپذیر بودن سوخت‌های فسیلی و اثرات سوء زیست‌محیطی آن به‌خصوص در گرمایش جهانی، کشورها را بر آن داشته است که به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر حرکت کنند. انرژی خورشیدی از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر است که دسترسی به آن نسبت به سایر انرژی‌های نو آسان‌تر است. سامانه‌های فتوولتائیک، مولدهایی هستند که به‌صورت مستقیم انرژی تابشی نور خورشید را به جریان الکتریکی تبدیل می‌کنند. بر اساس گزارش سالیانه IEA-PVPS^۱، در سال ۲۰۱۵ ظرفیت این سیستم‌ها به ۲۳۰ گیگاوات (حدود ۹۰ درصد سیستم‌های تولید انرژی متصل به شبکه) رسیده است [۱]. نمودار (۱-۱) رشد توان حاصل از سامانه‌های فتوولتائیک را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۱۸ میزان تولید مولدهای فتوولتائیک بالغ بر ۵۰۰ گیگاوات باشد. نمودار (۲-۱) قیمت متوسط پنل‌های خورشیدی در سال‌های اخیر به ازای تولید هر وات را بر اساس گزارش سازمان EIA^۲ آمریکا نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نمودار پیداست، قیمت پنل‌های خورشیدی در سال‌های اخیر کاهش شدیدی داشته است که بر سرعت رشد سامانه‌های فتوولتائیک افزوده است.



¹ International Energy Agency - Photovoltaic Power System Programme

² U.S. Energy Information Administration

شکل (۱-۱) رشد جهانی ظرفیت مولدهای فتوولتائیک بر اساس تخمین IEA [۲]



شکل (۲-۱) قیمت متوسط پنل‌های خورشیدی به ازای هر وات در طول سال‌های اخیر بر اساس گزارش سالانه سازمان EIA آمریکا [۳]

سامانه‌های فتوولتائیک نسبت به سایر مولدهای توان مزایایی دارد که از آن جمله می‌توان به موارد

زیر اشاره کرد [۴]:

- ۱) کوتاه بودن زمان طراحی، نصب و بهره‌برداری
- ۲) ماژولار بودن
- ۳) عدم استفاده از قطعات مکانیکی متحرک و در نتیجه عدم وجود آلودگی صوتی
- ۴) طول عمر بالا و نیاز به نگهداری پایین به دلیل عدم وجود قطعات مکانیکی متحرک
- ۵) قابلیت حمل و نقل آسان به دلیل وزن پایین

بر اساس گزارش ساتبا^۱ در ایران، اگر مساحتی معادل ۱۰۰ در ۱۰۰ کیلومترمربع به مولدهای فتوولتائیک اختصاص یابد، برق تولیدی آن معادل کل تولید برق کشور در سال ۱۳۸۹ خواهد بود [۵]. پتانسیل بالای ایران در استفاده از انرژی خورشیدی و مزایای انکارناپذیر آن نسبت به سایر منابع تأمین

^۱سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق

انرژی الکتریکی می‌بایست زمینه را برای گسترش هر چه بیشتر سامانه‌های فتوولتائیک در کشور فراهم آورد.

۱-۲ هدف پژوهش

در این پایان‌نامه، هدف کنترل توان راکتیو توسط سامانه فتوولتائیک متصل به شبکه تک‌فاز است. اینکه سامانه فتوولتائیک علاوه بر تزریق توان اکتیو به شبکه، بتواند توان راکتیو را نیز کنترل کند بسیار جذاب می‌نماید. در حالت کلی، سیستم کنترل سامانه فتوولتائیک سه وظیفه اصلی را بر عهده دارد. نخست سیستم کنترل می‌بایست با توجه به مشخصه جریان-ولتاژ پنل‌های خورشیدی، حداکثر توان ممکن را از این پنل‌ها استخراج نماید. این توان که DC است، باید به صورت AC به شبکه تزریق شود؛ بنابراین دو وظیفه دیگر سیستم کنترل، تزریق جریان سینوسی با اعوجاج هارمونیک کل (THD)¹ قابل قبول به شبکه و سنکرون‌سازی ولتاژ خروجی سیستم با ولتاژ شبکه می‌باشد. به منظور تأمین توان راکتیو موردنیاز شبکه، سیستم کنترل مجموعه علاوه بر وظایف ذکر شده، می‌بایست سامانه فتوولتائیک را به گونه‌ای کنترل نماید تا این توان راکتیو موردنیاز تا حد امکان تأمین شود. میزان این توان راکتیو از طریق مرکز کنترل شبکه و یا با توجه به میزان افت ولتاژ و یا اضافه ولتاژ شبکه در نقطه اتصال مشترک، در اختیار سامانه فتوولتائیک قرار می‌گیرد. پس از طراحی سیستم فتوولتائیک مورد نظر، سیستم شبیه‌سازی شده و نتایج به دست آمده مورد ارزیابی گرفته شده است.

۱-۳ مروری بر فصول پایان‌نامه

در فصل دوم پایان‌نامه، مجموعه قوانینی که در اتصال سامانه فتوولتائیک به شبکه می‌بایست مدنظر قرار گیرند مطرح خواهد شد. همچنین در این فصل علاوه بر طرح مبانی سامانه و نحوه طراحی برخی از پارامترهای آن، سیر تحولاتی که طول سال‌های اخیر در حوزه سامانه‌های فتوولتائیک اتفاق افتاده

¹ Total Harmonic Distortion

است نیز مرور خواهد شد. در ادامه فصل به روش‌هایی که برای تعیین توان راکتیو تزریقی یا مصرفی توسط سامانه فتوولتائیک به کار می‌روند، پرداخته خواهد شد.

فصل سوم به طراحی سامانه فتوولتائیک اختصاص دارد. شروع طراحی سامانه، ارائه معیاری برای انتخاب توان است و در ادامه فصل، پارامترهای سامانه با توجه به توان تعیین شده و پارامترهای شبکه محاسبه می‌شوند. سپس با توجه به پارامترهای محاسبه شده سامانه فتوولتائیک، سیستم کنترل طراحی می‌شود. از جمله اهدافی که در طراحی سیستم کنترل دنبال می‌شود، توانایی آن در کنترل توان راکتیو است. در ادامه فصل نیز یک استراتژی برای تعیین توان راکتیو با توجه به ولتاژ شبکه ارائه می‌شود.

سامانه فتوولتائیک طراحی شده و استراتژی کنترل توان راکتیو ارائه شده در فصل ۳، در فصل ۴ شبیه‌سازی شده و نتایج آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. فصل پنجم نیز به نتیجه‌گیری و پیشنهاد اختصاص یافته است.



فصل ۲

مروری بر سامانه‌های فتورولتائیک و

کنترل آن‌ها



۱-۲ مقدمه

در این فصل، هدف طرح قوانین و مبانی سامانه فتوولتائیک است که در فصول بعدی به عنوان مبنایی برای طراحی این سامانه به کار گرفته می‌شود. در ابتدا به مهم‌ترین مبنای طراحی سامانه فتوولتائیک، یعنی مجموعه قوانین شبکه پرداخته می‌شود. در صورتی که سامانه PV^۱ نتواند استانداردهای شبکه را رعایت کند، اجازه اتصال به شبکه را ندارد. در ادامه فصل به سیر تحول سامانه فتوولتائیک، مبانی و نحوه محاسبه پارامترهای آن پرداخته می‌شود. در نهایت به مرور روش‌هایی پرداخته خواهد شد که نحوه کنترل توان راکتیو توسط سامانه فتوولتائیک را مشخص می‌کنند.

۲-۲ قوانین اتصال سامانه فتوولتائیک به شبکه

کلیه سیستم‌هایی که به شبکه متصل می‌شوند، از مصرف‌کننده‌ها گرفته تا مولدهای انرژی الکتریکی، می‌بایست تابع قوانینی باشند که توسط شبکه توزیع وضع می‌شود. رعایت این قوانین، ادامه کار صحیح شبکه را ممکن می‌سازد. مولدهای فتوولتائیک نیز در صورتی اجازه تزریق انرژی به شبکه را دارند که استانداردهای شرکت توانیر را پیاده‌سازی کرده باشند. استاندارد مورد استفاده در مولدهای فتوولتائیک متصل به شبکه در ایران، استاندارد ملی ۱۱۸۵۹^۲ ارائه شده در مرجع [۶] است که بر اساس استانداردهای صنعتی برق کشور، استانداردهای ملی کشور، استانداردهای بین‌المللی (با تأکید بر IEC^۳) و استانداردهای کشورهای صنعتی پیشرفته نگارش شده است.

بر اساس استاندارد ۱۱۸۵۹، سامانه فتوولتائیک در سه مقوله هارمونیک‌ها و اعوجاج شکل موج، اضافه/کمبود ولتاژ و اضافه/کمبود فرکانس ملزم به رعایت قوانین ارائه شده است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

^۱ Photovoltaic System

^۲ ISIRI 11859

^۳ International Electro technical Commission

۱-۲-۲ هارمونیک‌ها و اعوجاج شکل موج

برای جلوگیری از اثرات مضر هارمونیک‌ها بر تجهیزات شبکه، خروجی سامانه PV می‌بایست اعوجاج جریان پایینی داشته باشد. بر اساس استاندارد ۱۱۸۵۹، اعوجاج جریان هارمونیک کل (THD) می‌بایست کم‌تر از ۵ درصد در خروجی اسمی اینورتر باشد. دامنه سایر هارمونیک‌ها نیز می‌بایست به درصدهای فهرست شده در جدول (۱-۲) محدود شود. همچنین مطابق استاندارد ۱۱۸۵۹، در آزمون هارمونیک‌ها می‌توان از حضور هارمونیک‌های ولتاژ شبکه در جریان تزریقی صرف‌نظر کرد. در نتیجه حضور هارمونیک‌های ولتاژ شبکه در جریان خروجی اینورتر مانعی ندارد.

جدول (۱-۲) حدود اعوجاج جریان خروجی سامانه فتوولتائیک [۶]

هارمونیک‌های فرد	
مرتبه هارمونیک	حدود اعوجاج
۳-۹	کم‌تر از ۴٪
۱۱-۱۵	کم‌تر از ۲٪
۱۷-۲۱	کم‌تر از ۱/۵٪
۲۳-۳۳	کم‌تر از ۰/۶٪
هارمونیک‌های زوج	
مرتبه هارمونیک	حدود اعوجاج
۲-۸	کم‌تر از ۱٪
۱۰-۳۳	کم‌تر از ۰/۵٪

۲-۲-۲ اضافه/کمبود ولتاژ

بر اساس استاندارد ۱۱۸۵۹، مقادیر مجاز برای ولتاژ شبکه بین ۸۵٪ تا ۱۱۰٪ مقدار نامی آن است. هنگامی که ولتاژ شبکه از این مقادیر منحرف شود، سامانه PV می‌بایست تزریق انرژی به شبکه را متوقف کند. جدول (۲-۲) عکس‌العمل سامانه PV در صورت بروز خطا را مشخص می‌کند. برای مثال اگر ولتاژ

نقطه اتصال مشترک (PCC¹) کمتر از ۵۰ درصد مقدار نامی شبکه باشد، در صورتی که خطای شبکه در مدت زمان ۰/۱ ثانیه رفع نشود، پس از اتمام این مدت زمان سامانه PV موظف است تزریق انرژی به شبکه را متوقف کند. در صورتی که شبکه به وضعیت قبلی خود بازگردد، سامانه PV می‌بایست تزریق انرژی به شبکه را از سر بگیرد.

جدول (۲-۲) پاسخ سامانه فتوولتائیک به ولتاژ غیرعادی [۶]

ولتاژ (در نقطه اتصال به شبکه)	بیشینه زمان قطع*
$V < \%50$	۰/۱ ثانیه
$\%50 \leq V < \%85$	۲/۰ ثانیه
$\%85 \leq V < \%110$	بهره‌برداری پیوسته
$\%110 \leq V < \%135$	۲/۰ ثانیه
$V \geq \%135$	۰/۰۵ ثانیه

* زمان قطع به زمان بین رخ دادن شرایط غیرعادی و توقف اینورتر از تزریق انرژی به شبکه اطلاق می‌شود

۳-۲-۲ اضافه/کمبود فرکانس

بر اساس استاندارد ۱۱۸۵۹، در صورتی که فرکانس شبکه از محدوده ± 1 Hz خارج شود، سامانه PV می‌بایست حداکثر ظرف مدت ۰/۲ ثانیه تزریق انرژی به شبکه را متوقف کند. اگر فرکانس شبکه قبل از بازه زمانی ۰/۲ ثانیه در محدوده مجاز قرار گیرد، واحد مجبور نیست تزریق انرژی به شبکه را متوقف کند.

۳-۲-۳ انرژی خورشید

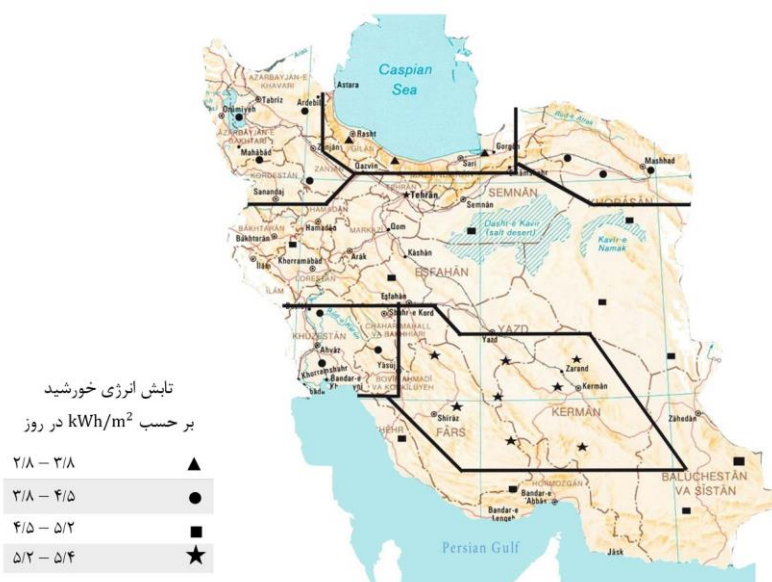
میزان انرژی که از خورشید به لایه بیرونی اتمسفر زمین می‌رسد در ایام مختلف سال بین W/m^2 ۱۳۲۵ تا W/m^2 ۱۴۱۲ تخمین زده می‌شود. اما به دلیل انعکاس، جذب انرژی (توسط اوزون، بخار آب،

¹ Point of Common Coupling

اکسیژن و کربن دی اکسید) و پراکندگی نور (به دلیل مولکول های هوا، ذرات غبار و آلودگی هوا)، میزان انرژی رسیده به سطح زمین کاهش می یابد که به طور متوسط می توان این مقدار را 1000 W/m^2 در نظر گرفت [۷].

از آنجاکه سرمایه گذاری بر روی سامانه های فتوولتائیک چه به صورت نیروگاه های بزرگ و چه به صورت مسکونی هزینه بر است، پتانسیل مناطق مستعد به کارگیری انرژی خورشیدی برای بازگشت سرمایه می بایست سنجیده شود. انرژی دریافتی توسط پنل های خورشیدی به عواملی مانند موقعیت جغرافیایی، دمای هوا، رطوبت، وزش باد و پوشش ابر وابسته است [۷]؛ بنابراین برای بررسی مستعد بودن یک منطقه، به داده های اقلیمی که توسط سازمان های هواشناسی ارائه می شود نیاز است.

کشور ما ایران با داشتن ۳۰۰ روز آفتابی در بیش از دو سوم مساحت آن که انرژی متوسط $4/5$ تا $5/5$ کیلووات ساعت بر مترمربع در روز از طریق خورشید دریافت می کنند، می تواند پتانسیل بالایی در استفاده از انرژی خورشیدی داشته باشد [۵]. شکل (۲-۱) پتانسیل تابش خورشیدی در ایران را نمایش می دهد. بر اساس این شکل مناطق بسیاری در کشور وجود دارند که سرمایه گذاری در بخش انرژی خورشیدی در آنها می تواند توجیه اقتصادی داشته باشد.



شکل (۲-۱) پتانسیل تابش خورشیدی در ایران [۵]

۴-۲ پنل‌های خورشیدی

برای ایجاد جریان الکتریکی در یک مدار، نیاز به ایجاد بستری برای جابجایی الکترون‌ها در آن مدار است. سلول‌های خورشیدی^۱ این بستر را به کمک نور خورشید فراهم می‌کنند. در این سلول‌ها، برای ایجاد جریان الکتریکی از مواد نیمه‌رسانا استفاده می‌شود. اساس تبدیل انرژی در سلول‌های خورشیدی بر دو پایه استوار است: نخست جذب انرژی نور خورشید توسط الکترون و یا حفره اتم نیمه‌رسانا و دوم شارش الکترون‌ها به سمت پایانه منفی و یا حفره‌ها به سمت پایانه مثبت. بدین ترتیب انرژی خورشید توسط یک نیمه‌رسانا به جریان الکتریکی تبدیل می‌شود.

از ترکیب چند سلول خورشیدی یک ماژول خورشیدی^۲ و از ترکیب چند ماژول خورشیدی یک پنل خورشیدی^۳ ساخته می‌شود. در ادامه مطالبی در مورد انواع مختلف پنل‌های خورشیدی و نحوه مدل‌سازی پنل‌ها ارائه می‌شود.

۴-۲-۱ انواع مختلف پنل خورشیدی

پنل‌های خورشیدی رایج بر اساس مواد به‌کاررفته در آن به دو گروه کلی مبتنی بر سیلیکون کریستالی^۴ و لایه‌نازک^۵ دسته‌بندی می‌شوند [۸]. جدول (۲-۳) به بررسی انواع مختلف پنل‌ها به لحاظ بازده، مزایا و معایب می‌پردازد. بر اساس این جدول می‌توان گفت که پنل‌های مبتنی بر سیلیکون کریستالی بازده و طول عمر بالاتر و پنل‌های لایه‌نازک قیمت مناسب‌تری دارند. انتخاب نوع پنل در فرآیند طراحی سامانه فتوولتائیک به دو فاکتور میزان هزینه و فضای در دسترس وابسته است. این دو فاکتور در طراحی سامانه‌های فتوولتائیک مسکونی که هم به لحاظ هزینه و هم به لحاظ فضا محدودیت وجود دارد، پررنگ‌تر می‌شود.

¹ Photovoltaic Cell

² Photovoltaic Module

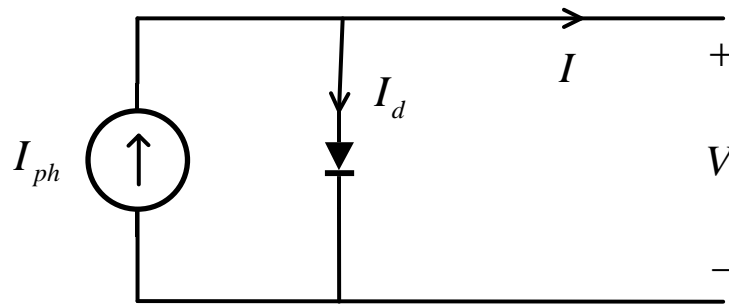
³ Photovoltaic Panel

⁴ Crystalline Silicon (c-Si)

⁵ Thin-Film Solar Cells (TFSC)

جدول (۲-۳) مقایسه انواع مختلف پنل خورشیدی [۸]

مزایا و معایب	بازده	نوع	گروه
<p>مزایا:</p> <ul style="list-style-type: none"> • بالاترین میزان بازده • بالاترین نرخ توان خروجی به فضای اشغال شده • بالاترین میزان طول عمر • عملکرد بهتر در نور کم <p>معایب:</p> <ul style="list-style-type: none"> • بالاترین قیمت نسبت به سایر پنل‌ها • از کار افتادن کل مدار در صورت پوشیده شدن با سایه، گردوغبار و یا برف 	۱۵ تا ۲۰ درصد	Monocrystalline Silicon (mono-Si)	Crystalline Silicon (c-Si)
<p>مزایا:</p> <ul style="list-style-type: none"> • فرایند ساخت ساده‌تر و قیمت پایین‌تر نسبت به mono-Si • بازده بالا • طول عمر بالا <p>معایب:</p> <ul style="list-style-type: none"> • بازده پایین‌تر از mono-Si • پایین‌تر بودن نرخ توان خروجی به فضای اشغال شده نسبت به mono-Si 	۱۳ تا ۱۶ درصد	Polysilicon (p-Si) or Multi-Crystalline Silicon (mc-Si)	
<p>مزایا:</p> <ul style="list-style-type: none"> • تولید انبوه ساده • قیمت پایین‌تر از ساختارهای مبتنی بر c-Si • انعطاف پذیری • تأثیر کم‌تر دمای بالا و سایه بر روی پنل‌ها به نسبت ساختارهای مبتنی بر c-Si • بهترین گزینه در صورتی که محدودیتی از نظر فضا وجود نداشته باشد <p>معایب:</p> <ul style="list-style-type: none"> • نرخ پایین توان خروجی به فضای اشغال شده • طول عمر کوتاه‌تر نسبت ساختارهای مبتنی بر c-Si 	۶ تا ۸ درصد	Amorphous silicon (a-Si)	Thin-Film Solar Cells (TFSC)
	۹ تا ۱۱ درصد	Cadmium telluride (CdTe)	
	۱۰ تا ۱۲ درصد	Copper indium gallium selenide (CIS/CIGS)	
	۱۰ تا ۱۵ درصد	Organic photovoltaic cells (OPC)	



شکل (۲-۲) مدار معادل یک سلول خورشیدی ایده‌آل

۲-۴-۲ مدل پنل خورشیدی و مشخصه‌های آن

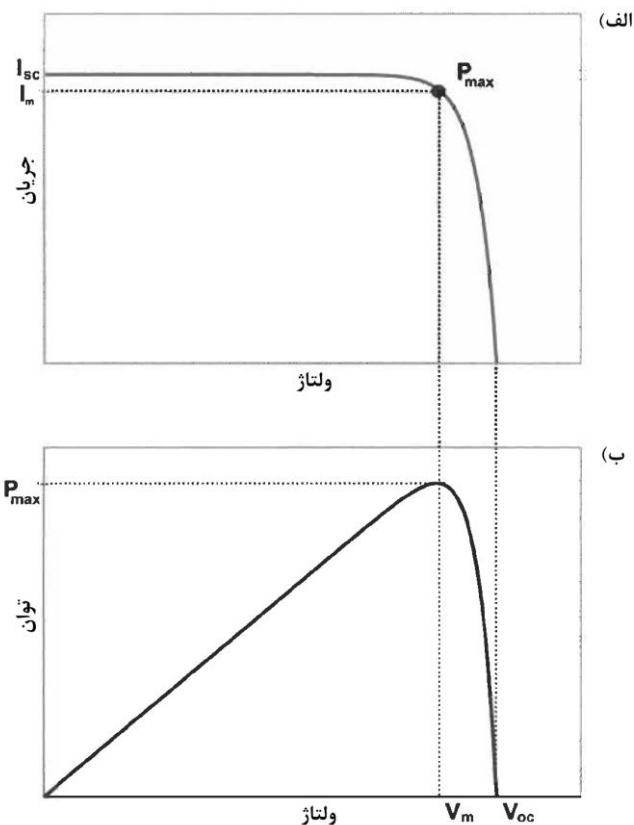
یک سلول خورشیدی ایده‌آل را می‌توان با استفاده از یک منبع جریان که یک دیود به صورت موازی به آن متصل شده است، مدل کرد. این مدل در شکل (۲-۲) نمایش داده شده است. جریان خروجی سلول خورشیدی از رابطه زیر به دست می‌آید [۴]:

$$I = I_{ph} - I_d \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (1-2)$$

که k_B ثابت بولتزمن^۱، T دمای مطلق، q بار الکترون، I_d جریان اشباع دیود، I_{ph} جریان تولیدشده توسط نور خورشید و V ولتاژ خروجی سلول خورشیدی است. با توجه به این رابطه، بین جریان و ولتاژ خروجی سلول خورشیدی رابطه‌ای وجود دارد. شکل (۳-۲)-الف رابطه بین جریان و ولتاژ سلول خورشیدی، که مشخصه جریان-ولتاژ (I-V) سلول خورشیدی نامیده می‌شود، را نمایش می‌دهد. در صورتی که در رابطه (۱-۲) به جای جریان رابطه $I = P/V$ جایگزین شود، مشخصه توان-ولتاژ (P-V) حاصل می‌شود. شکل (۳-۲)-ب مشخصه توان-ولتاژ سلول خورشیدی را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل، به ازای یک جریان و ولتاژ خاص در یک نقطه، توان حداکثر می‌شود. این نقطه را نقطه حداکثر توان (MPP) می‌نامند.

¹ Boltzmann constant

² Maximum Power Point

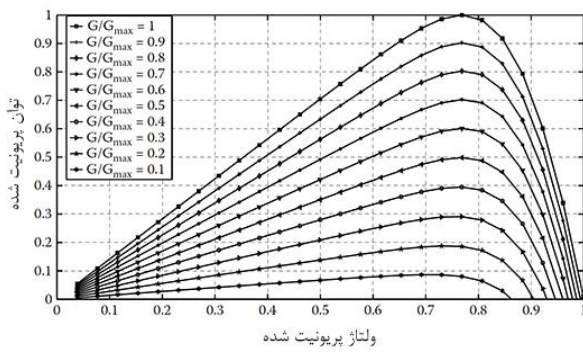


شکل (۳-۲) مشخصه‌های سلول خورشیدی [۴] الف) مشخصه جریان-ولتاژ (I-V) ب) مشخصه توان-ولتاژ (P-V)

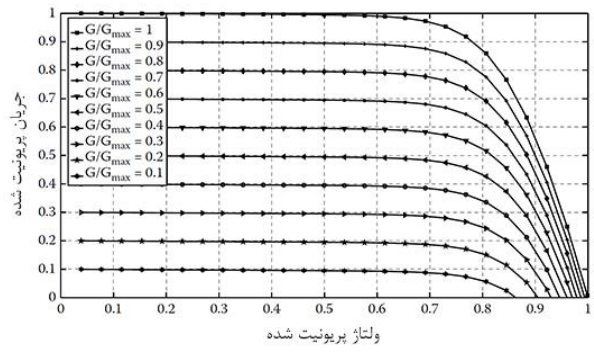
توان خروجی یک سلول خورشیدی علاوه بر بازده سلول، به دو عامل میزان تابش نور و دمای محیط نیز وابسته است [۹]. شکل (۴-۲) تأثیر این دو عامل را بر روی توان خروجی سلول خورشیدی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، افزایش دما و یا کاهش میزان تابش نور خورشید باعث کاهش توان خروجی سلول خورشیدی می‌شود.

تا اینجا مدل ایده‌آل سلول خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت. در مدل غیر ایده‌آل سلول خورشیدی، علاوه بر المان‌های مدل ایده‌آل آن، یک دیود، یک مقاومت سری (R_s) و یک مقاومت موازی (R_p) نیز به مدل اضافه می‌شوند؛ شکل (۵-۲). رابطه زیر، جریان خروجی این مدل را نشان می‌دهد [۴]:

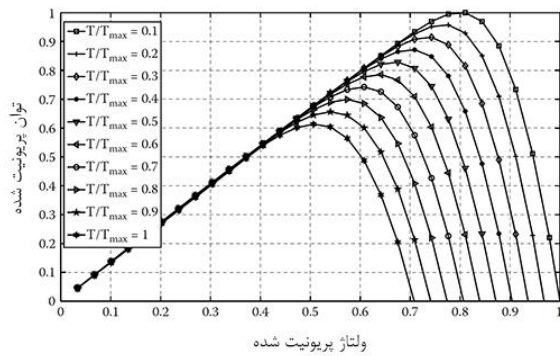
$$I = I_{ph} - I_{d1} \left(e^{\frac{V+IR_s}{k_B T}} - 1 \right) - I_{d2} \left(e^{\frac{V+IR_s}{2k_B T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (۲-۲)$$



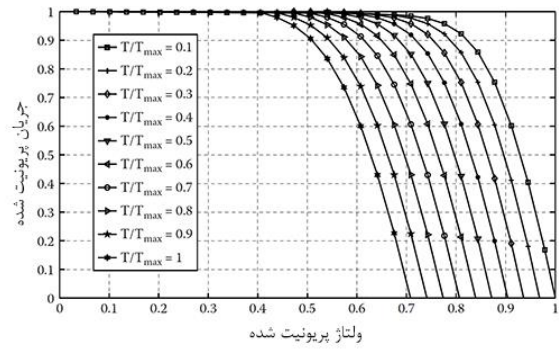
ب



الف

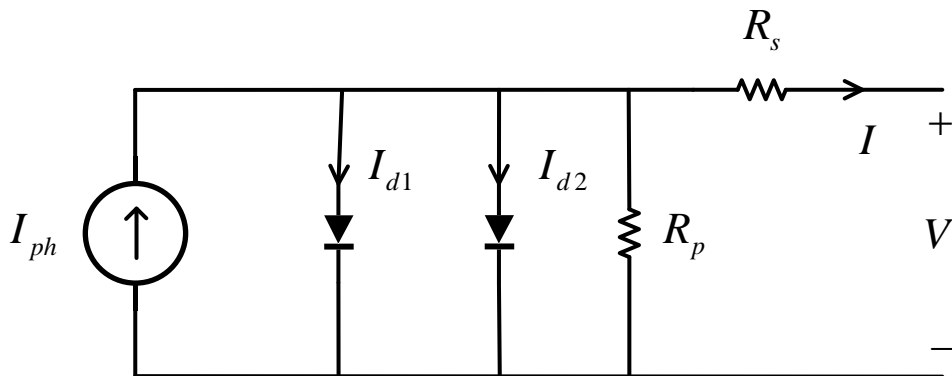


د



ج

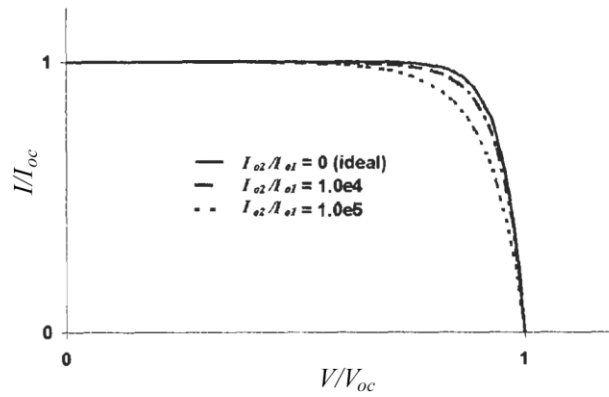
شکل (۲-۴) تأثیر میزان نور خورشید و دما بر روی مشخصه‌های سلول خورشیدی [۹]
 الف) تأثیر میزان نور خورشید بر روی مشخصه I-V ب) تأثیر میزان نور خورشید بر روی مشخصه P-V
 ج) تأثیر دما بر روی مشخصه I-V د) تأثیر دما بر روی مشخصه P-V



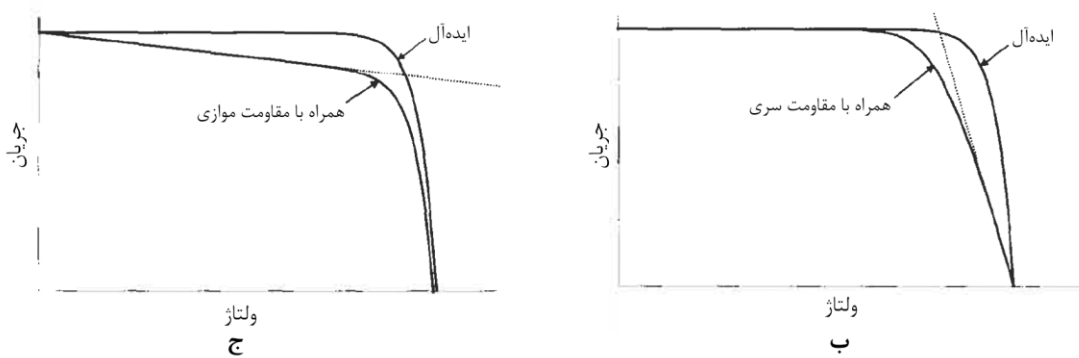
شکل (۲-۵) مدار معادل یک سلول خورشیدی غیر ایده‌آل

هرکدام از المان‌های مدل غیر ایده‌آل، تأثیر خاصی بر روی مشخصه I-V می‌گذارند. این تأثیر در

شکل (۲-۶) نمایش داده شده است.



الف

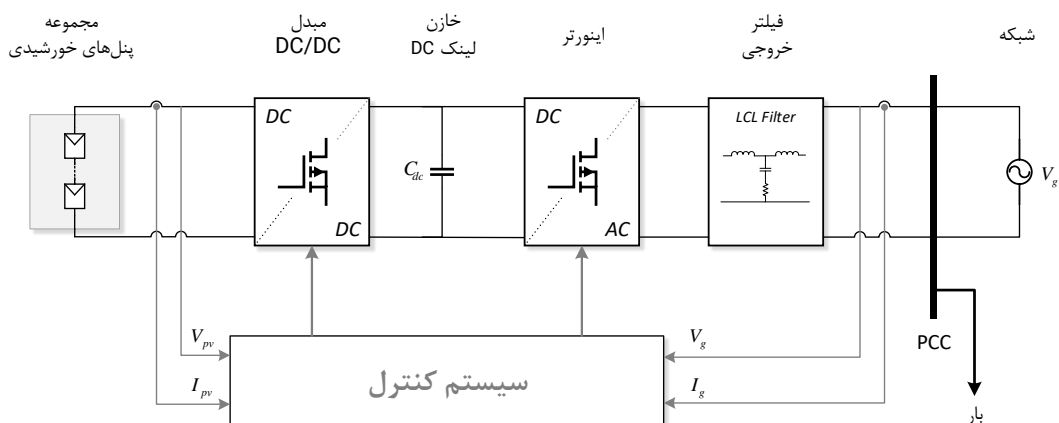


شکل (۶-۲) تأثیر المان‌های مدل غیر ایده‌آل سلول خورشیدی بر روی مشخصه جریان-ولتاژ (I-V) [۴]
 الف) تأثیر نسبت جریان اشباع دیودها (I_{d2}/I_{d1}) ب) تأثیر مقاومت سری (R_s) ج) تأثیر مقاومت موازی (R_p)

هر پنل خورشیدی از چندین سلول خورشیدی که به صورت سری به هم متصل شده‌اند، ساخته می‌شود. بنابراین تمامی مطالب گفته شده برای یک پنل خورشیدی نیز صادق است.

۵-۲ مروری بر مبانی و سیر تحول سامانه فتوولتائیک

در سال‌های اخیر پیشرفت‌های گسترده در حوزه نیمه‌رسانا باعث کاهش هزینه تولید پنل‌های خورشیدی و در نتیجه گسترش استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک شده است. شکل (۷-۲) شمای کلی از سامانه فتوولتائیک را نمایش می‌دهد. اجزای تشکیل‌دهنده این سامانه عبارت‌اند از: مجموعه پنل‌های خورشیدی، مبدل بوست، خازن لینک DC، فیلتر خروجی اینورتر و سیستم کنترل. در ادامه به بررسی تئوری این اجزا و سیر تحول آن‌ها در طول سال‌های اخیر پرداخته می‌شود.



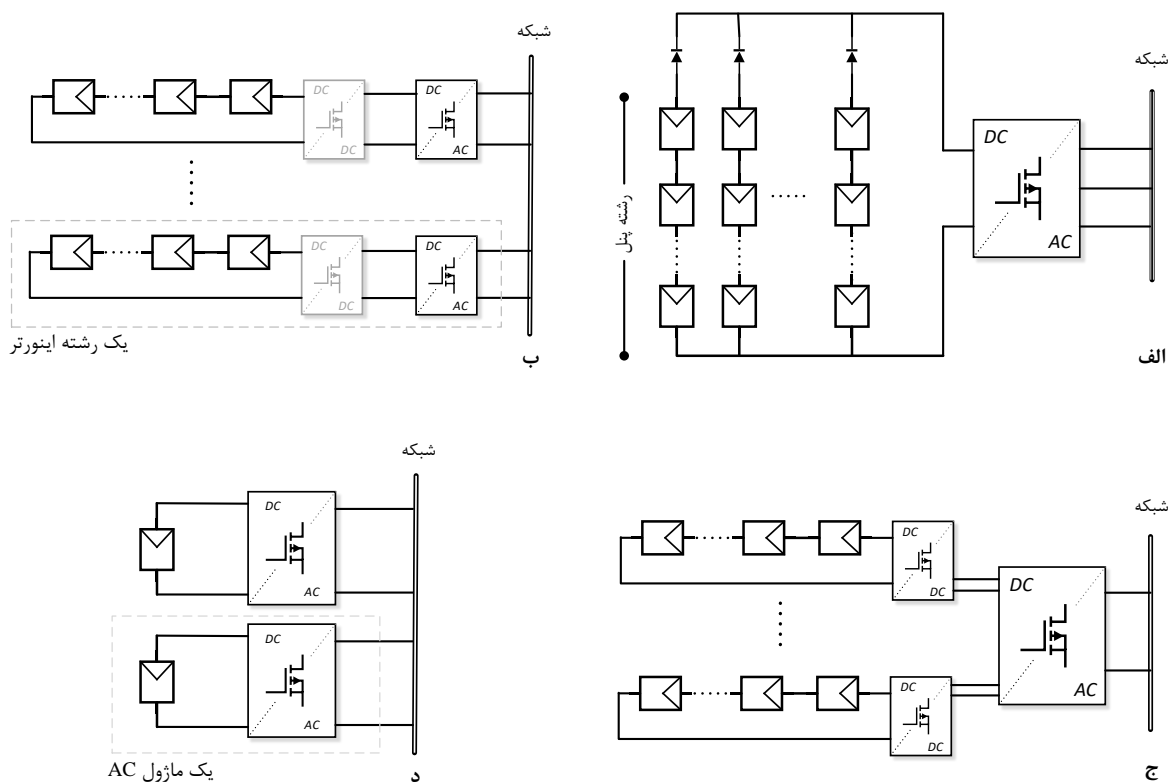
شکل (۷-۲) شمای کلی سامانه فتوولتائیک

۲-۵-۱ مجموعه پنل‌های خورشیدی

سامانه‌های فتوولتائیک در طول سال‌های اخیر تغییرات زیادی به خود دیده‌اند به طوری که از ساختار بسیار بزرگ و حجیم در قالب نیروگاه‌های عظیم به ساختار ماژولار و کوچک چه برای استفاده در نیروگاه‌ها و چه پشت‌بام ساختمان‌های مسکونی تغییر شکل داده‌اند. نحوه تغذیه اینورتر مهم‌ترین اساس تحول سامانه فتوولتائیک بوده است.

شکل (۸-۲) الف فناوری قدیمی سامانه PV که با نام اینورتر متمرکز^۱ شناخته می‌شود را نشان می‌دهد [۱۰]. در این ساختار، پنل‌ها به گونه‌ای متصل می‌شوند که ولتاژ و توان مدنظر را ایجاد می‌کنند. ابتدا پنل‌ها به صورت سری برای افزایش ولتاژ خروجی با یکدیگر سری می‌شوند که به آن رشته پنل می‌گویند. این کار نیاز به تقویت ولتاژ را از بین می‌برد. سپس رشته پنل‌ها برای تولید توان بالا به کمک یک دیود، به صورت موازی به هم متصل می‌شوند. این ساختار دارای معایبی مانند نیاز به کابل‌های فشارقوی جهت اتصال پنل‌ها به همدیگر و به اینورتر، تلفات توان به دلیل ردیابی MPP متمرکز، تلفات بین پنل‌ها به دلیل عدم مطابقت آن‌ها، تلفات در دیودهای رشته پنل‌ها و عدم انعطاف‌پذیری پس از طراحی می‌باشد [۱۱].

¹ Centralized inverter



شکل (۸-۲) (الف) فتاوری اینورتر متمرکز (ب) فتاوری رشته اینورتر (ج) فتاوری اینورتر چند رشته‌ای (د) فتاوری ماژول AC

شکل (۸-۲) ب- فتاوری رشته اینورترها^۱ که در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرد را نشان می‌دهد. این ساختار، شکل کاهش یافته‌ای از فتاوری متمرکز است که صرفاً یک رشته پنل به اینورتر متصل می‌شود [۱۰]. بسته به تعداد پنل‌های خورشیدی که باهم سری می‌شوند، ولتاژ خروجی آن‌ها ممکن است نیاز به تقویت داشته باشد؛ به این منظور از یک مبدل DC/DC برای افزایش ولتاژ استفاده می‌شود. برخلاف فتاوری متمرکز، در این ساختار تلفات دیود وجود ندارد. از طرفی استفاده از روش MPP تنها بر روی یک رشته انجام می‌شود که بازده این ساختار را نسبت به ساختار متمرکز افزایش می‌دهد [۱۱].

^۱ String inverters

شکل (۲-۸) - ج فناوری اینورتر چند رشته‌ای^۱ را نشان می‌دهد [۱۲]. در این فناوری، هر کدام از رشته‌ها مبدل DC/DC مختص خودشان را دارند. این فناوری نسبت به ساختار متمرکز دو مزیت عمده دارد: به دلیل عدم استفاده از دیود، تلفات دیودی وجود ندارد و در هر رشته MPP به کمک مبدل DC/DC مختص خودش پیاده‌سازی می‌شود که افزایش بازده را در پی دارد. از طرف دیگر در این ساختار می‌توان به کمک اتصال و یا خارج کردن رشته‌ها از لینک DC، توان خروجی را کنترل کرد. مزیت دیگر این روش، انعطاف‌پذیری بالای آن برای توسعه آتی مجموعه است، به طوری که می‌توان با اضافه کردن رشته و یا رشته‌های دیگر (و احیاناً تغییر اینورتر) میزان توان خروجی سامانه را افزایش داد [۱۱].

ماژول AC^۲ که در شکل (۲-۸) - د ترسیم شده است، هر پنل خورشیدی را به یک مولد توان تبدیل می‌کند [۱۰]. از آنجاکه فقط یک پنل در این ساختار وجود دارد، مشکل عدم مطابقت پنل‌ها کاملاً مرتفع می‌گردد. همچنین این ساختار، فرآیند توسعه سامانه را به ساده‌ترین شکل ممکن امکان‌پذیر می‌کند چراکه برای توسعه کافی است ماژول‌های جدید خریداری و نصب شوند. علاوه بر مزایای مطرح‌شده، این ساختار یک مزیت بسیار بزرگ دیگر نیز دارد: قابلیت «اتصال و استفاده»^۳؛ این قابلیت باعث می‌شود هر کاربری بتواند ماژول یا ماژول‌های مدنظر خود را تهیه کند و خود، بدون اینکه نیاز به دانشی در مورد طراحی سامانه‌های فتوولتائیک داشته باشد، اقدام به نصب و راه‌اندازی آن‌ها نماید [۱۱].

۲-۵-۲ مبدل DC/DC

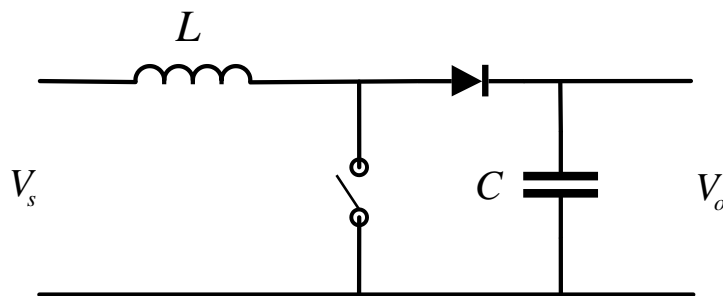
اینورتر جهت تبدیل توان DC به AC می‌بایست در ورودی خود با ولتاژی تغذیه شود که حداقل مقدار آن برابر با دامنه ولتاژ خروجی است. ممکن است پنل‌های خورشیدی قادر به تأمین این ولتاژ در خروجی خود نباشند. از طرف دیگر ممکن است خروجی پنل‌ها به قدری بالا باشد که باعث افزایش هزینه

¹ Multi-string inverter

² AC module

³ Plug-and-Play

قطعات استفاده شده در سامانه PV شود. در این صورت از مبدل های DC/DC برای رساندن ولتاژ خروجی پنل ها به مقدار مورد نظر استفاده می شود. از مبدل هایی مانند مبدل باک^۱ برای کاهش سطح ولتاژ خروجی و مبدل هایی مانند مبدل بوست^۲ برای افزایش سطح ولتاژ پنل های خورشیدی استفاده می شود. معمولاً سامانه های فتوولتائیک به کاررفته در مصارف مسکونی به دلیل توان پایین، قادر به تأمین سطح ولتاژ مدنظر نیستند. از این رو برای افزایش ولتاژ به سطح مطلوب از یک مبدل بوست استفاده می شود. شمای این مبدل در شکل (۹-۲) نمایش داده شده است.



شکل (۹-۲) شمای کلی مبدل بوست

در مبدل بوست، رابطه زیر نسبت بین ولتاژ خروجی مبدل و ولتاژ ورودی آن را بیان می کند [۱۳]:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-d} \quad (۳-۲)$$

که در این رابطه، V_o ولتاژ خروجی مبدل بوست، V_s ولتاژ ورودی مبدل بوست و d سیکل وظیفه

می باشد. حداقل مقدار سلف و خازن برای این مبدل به ترتیب از روابط زیر محاسبه می شود [۱۳]:

$$L > \frac{d(1-d)^2 V_{dc}^2}{2 f_{sw} P_n} \quad (۴-۲)$$

^۱ Buck Converter

^۲ Boost Converter

$$C > \frac{d P_n}{V_{dc}^2 \left(\frac{\Delta V}{V_o} \right) f_{sw}} \quad (5-2)$$

که در این دو رابطه، V_{dc} ولتاژ مدنظر در خروجی مبدل (در سامانه فتوولتائیک: ولتاژ لینک DC)، P_n توان نامی سامانه فتوولتائیک و f_{sw} فرکانس کلیدزنی مبدل می‌باشد.

۳-۵-۲ خازن لینک DC

در سامانه فتوولتائیک، خازن لینک DC برای رفع مشکل عدم تطابق توان لحظه‌ای خروجی سامانه PV که مقداری متغیر با زمان است و توان لحظه‌ای ورودی که مقداری DC است به کار می‌رود [۱۴]. از آنجاکه حضور این خازن در پیکربندی سامانه فتوولتائیک ضروری است در ادامه به نحوه محاسبه آن پرداخته می‌شود.

روابط (۶-۲) و (۷-۲) به ترتیب ولتاژ لحظه‌ای شبکه و جریان لحظه‌ای تزریق شده به شبکه را نمایش می‌دهد.

$$v(t) = \sqrt{2} V_{g(rms)} \sin(\omega_g t) \quad (6-2)$$

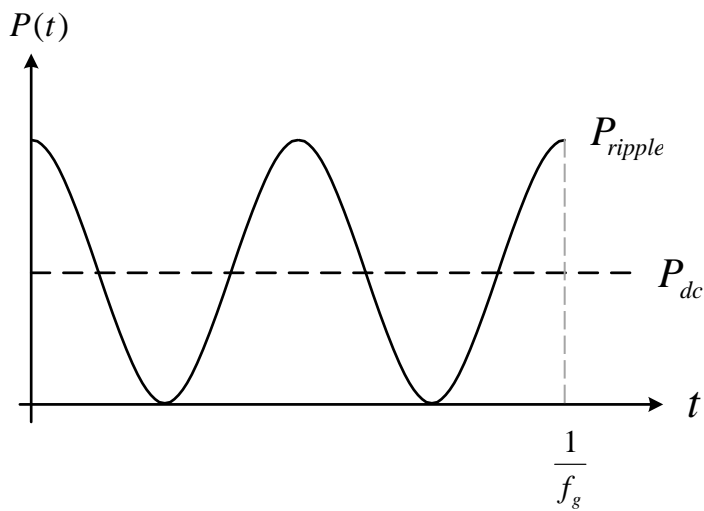
$$i(t) = \sqrt{2} I_{g(rms)} \sin(\omega_g t + \varphi) \quad (7-2)$$

در این روابط ω_g فرکانس شبکه، $V_{g(rms)}$ ولتاژ مؤثر شبکه، $I_{g(rms)}$ جریان مؤثر تزریقی به شبکه و φ اختلاف فاز بین ولتاژ شبکه و توان تزریقی به آن می‌باشد. بر اساس روابط (۶-۲) و (۷-۲)، توان لحظه‌ای خروجی $p_o(t)$ را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$p_o(t) = v(t) \times i(t) = V_{g(rms)} I_{g(rms)} + V_{g(rms)} I_{g(rms)} \cos(2\omega_g + \varphi) \quad (8-2)$$

شکل (۲-۱۰) توان لحظه‌ای خروجی رابطه (۸-۲) را نمایش می‌دهد. این توان دارای دو قسمت می‌باشد: قسمت اول توان متوسط خروجی را نشان می‌دهد ($V_{g(rms)} I_{g(rms)}$). قسمت دوم شامل توان

متغیر با زمان است که فرکانسی دو برابر فرکانس شبکه دارد $(V_{g(rms)} I_{g(rms)} \cos(2\omega_g + \varphi))$. در سامانه فتوولتائیک توان ورودی مقداری ثابت و برابر $p_{in}(t) = V_{pv} I_{pv}$ است. در این رابطه V_{pv} و I_{pv} به ترتیب ولتاژ و جریان خروجی پنل‌های PV می‌باشد. با صرف نظر از تلفات اینورتر و طبقه DC/DC، توان ورودی و مقدار متوسط توان خروجی باهم برابرند. رابطه (۹-۲) اختلاف توان لحظه‌ای ورودی و توان لحظه‌ای خروجی را نمایش می‌دهد. این مقدار برابر با توان لحظه‌ای نوسانی است که منجر به عدم تطابق توان‌های ورودی و خروجی می‌شود.



شکل (۱۰-۲) توان لحظه‌ای AC

$$p_{ripple}(t) = p_o(t) - p_{in}(t) = V_{g(rms)} I_{g(rms)} \cos(2\omega_g + \varphi) \quad (9-2)$$

با فرض ضریب توان واحد، انرژی مبادله شده ناشی از این توان نوسانی در یک چهارم دوره زمانی آن

از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۴]:

$$E = 2 \int_0^{1/8f_g} p_{ripple}(t) dt = \frac{1}{\omega_g} V_{g(rms)} I_{g(rms)} \quad (10-2)$$

در صورتی که از یک خازن در لینک DC استفاده شود، میزان انرژی که صرف شارژ و دشارژ خازن در نیمی از دوره زمانی توان نوسانی می شود برابر با رابطه زیر است [۱۴]:

$$E = CV_{dc} \left[\int_0^{1/8f_g} dv + \int_{1/8f_g}^{1/4f_g} dv \right] = CV_{dc} [V_{dc}^{max} - V_{dc}^{min}] \quad (11-2)$$

از آنجا که انرژی مبادله شده ناشی از توان نوسانی همان انرژی است که صرف شارژ و دشارژ خازن می شود، با برابر قرار دادن روابط (۲-۱۰) و (۲-۱۱) ظرفیت خازن محاسبه می شود [۱۴]. حاصل این دو رابطه، رابطه (۲-۱۲) است که ظرفیت خازن لینک DC را نمایش می دهد.

$$C = \frac{V_g(rms)I_g(rms)}{\omega_g V_{dc} (V_{dc}^{max} - V_{dc}^{min})} = \frac{S_n}{\omega_g V_{dc} \Delta V} \quad (12-2)$$

در این رابطه S_n توان ظاهری نامی سامانه فتوولتائیک و ΔV حداکثر ریپل مجاز برای ولتاژ DC می باشد.

۲-۵-۴ اینورتر و روش های کلیدزنی آن

ساختار اینورتر و نحوه کلیدزنی آن می تواند بر عملکرد سامانه فتوولتائیک تأثیر داشته باشد. محققان و پژوهشگران ساختارهای متفاوتی برای اینورتر سامانه فتوولتائیک ارائه کرده اند [۱۷-۱۵] ولی دلایلی مثل تعداد بالای قطعات و یا پیچیدگی ساختار، مانع از استفاده از آنها در صنعت شده است. در حال حاضر سه ساختار تمام پل، H5 و هریک^۱ از جمله ساختارهای پر کاربرد در صنعت هستند [۱].

شکل (۲-۱۱) الف ساختار اینورتر تمام پل که رایج ترین ساختار اینورتری است را نشان می دهد. روش های کلیدزنی دوقطبی و تک قطبی، دو روش رایج برای کنترل کلیدهای به کار رفته در این ساختار است. در صورتی که V_{dc} ولتاژ تغذیه اینورتر باشد، در روش دوقطبی برای ساخت ولتاژ مطلوب در خروجی اینورتر، با مقایسه سیگنال دندان اره ای و ولتاژ مرجع که الگوی روشن و خاموش شدن کلیدها را تعیین

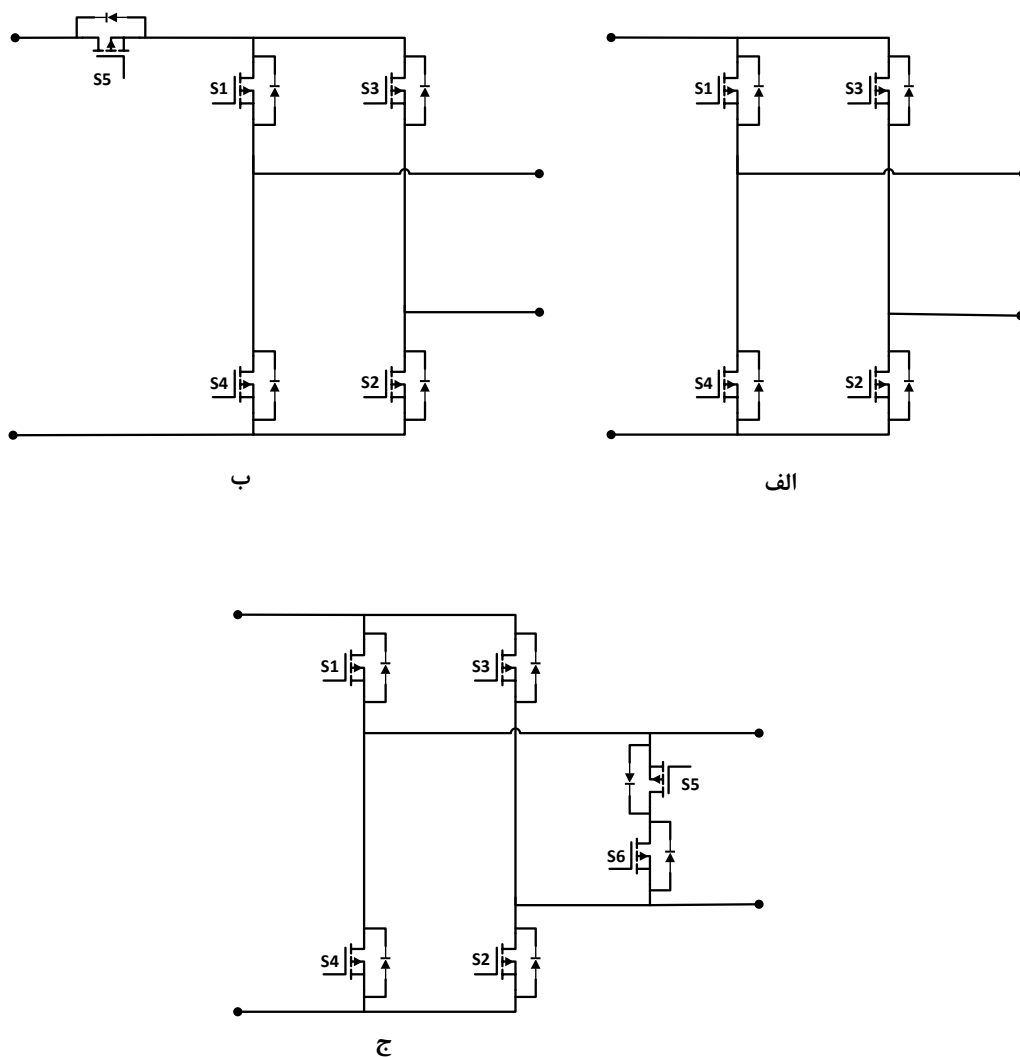
¹ Highly Efficient and Reliable Inverter Concept (HERIC)

می‌کند، مقادیر $+V_{dc}$ و $-V_{dc}$ در خروجی ایجاد می‌شود. اما در روش تک‌قطبی، در نیم‌سیکل مثبت ولتاژ مرجع، مقادیر صفر و $+V_{dc}$ و در نیم‌سیکل منفی ولتاژ مرجع مقادیر صفر و $-V_{dc}$ در خروجی اینورتر ایجاد می‌شوند. شکل‌های (۱۲-۲) الف و (۱۲-۲) ب به ترتیب نحوه کنترل کلیدهای نیمه‌هادی در اینورتر تمام‌پل را با روش‌های کلیدزنی دوقطبی و تک‌قطبی نشان می‌دهد.

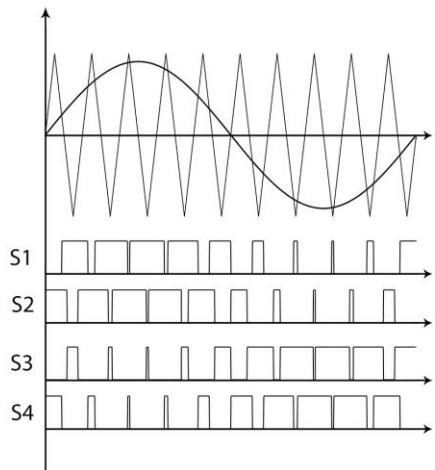
یکی از مزایای بزرگ روش کلیدزنی تک‌قطبی نسبت به کلیدزنی دوقطبی، انتقال هارمونیک‌های عمده از m_f به $2m_f - 1$ است [۱۸] (m_f در اینجا مرتبه هارمونیک و برابر با نسبت فرکانس کلیدزنی به فرکانس ولتاژ خروجی اینورتر است)؛ اما در صورتی که اینورتر تمام‌پل با استفاده از این روش کلیدزنی شود، جریان نشتی بالایی به دلیل ایجاد خازن بین بدنه پنل خورشیدی و پایه آلومینیومی نگه‌دارنده آن که به زمین متصل است، جاری می‌شود [۱۹]. در مرجع [۲۰] اساس شکل‌گیری این جریان نشتی مورد بررسی قرار گرفته است. برای تضعیف این جریان، محققان دو ساختار اینورتری H5 و هریک را ارائه کرده‌اند. ساختار H5 که در شکل (۱۱-۲) ب نمایش داده شده است، ساختاری بر پایه ساختار تمام‌پل است که علاوه بر چهار کلید موجود، یک کلید در سمت DC به آن اضافه شده است. این کلید هنگام عملیات هرزگرد (زمانی که می‌بایست ولتاژ خروجی اینورتر صفر باشد)، وظیفه جداسازی ورودی DC از خروجی را بر عهده دارد. در صورتی که از روش کلیدزنی دوقطبی بر روی این اینورتر استفاده شود، کلید ۵ می‌بایست دائماً روشن باشد که آن را تبدیل به یک اینورتر تمام‌پل می‌کند. بنابراین استفاده از کلیدزنی دوقطبی در ساختار H5 توجیهی ندارد. مرجع [۲۱] روشی برای کلیدزنی تک‌قطبی اینورتر H5 ارائه داده است. بر اساس این روش، نحوه کنترل کلیدهای اینورتر H5 همانند شکل (۱۲-۲) ج خواهد بود. این روش کلیدزنی بر پایه روش کلیدزنی تک‌قطبی است که جریان نشتی را کاهش می‌دهد [۲۱].

ساختار هریک نیز مشابه H5 بر پایه ساختار تمام‌پل طراحی شده است. همان‌طور که در شکل (۱۱-۲) ج نمایش داده شده است، در این ساختار از دو کلید نیمه‌هادی در سمت AC برای عملیات

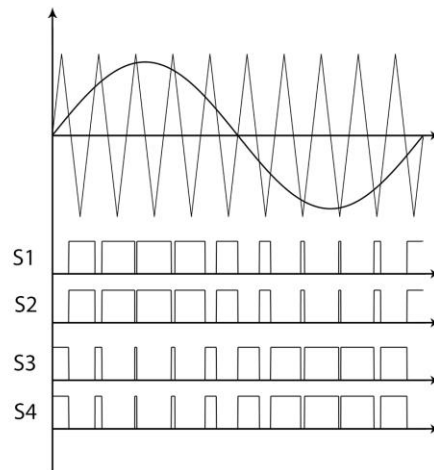
هرزگرد استفاده می‌شود. در این ساختار نیز استفاده از روش کلیدزنی دوقطبی توجیهی ندارد چراکه در این صورت، کلیدهای ۵ و ۶ دائماً خاموش هستند. شکل (۲-۱۲) د- نحوه کنترل کلیدهای اینورتر را با روش کلیدزنی تک‌قطبی ارائه شده در مرجع [۲۱] نمایش می‌دهد. همانند اینورتر H5، استفاده از این روش کلیدزنی در اینورتر هر یک نیز باعث تضعیف جریان نشتی می‌شود.



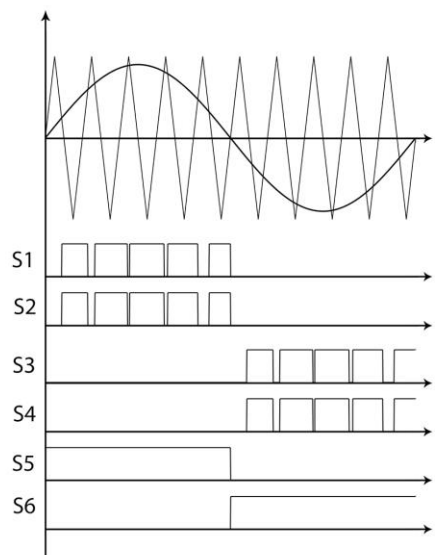
شکل (۲-۱۱) ساختارهای مختلف اینورتری (الف) ساختار تمام پل (ب) ساختار H5 (ج) ساختار هر یک



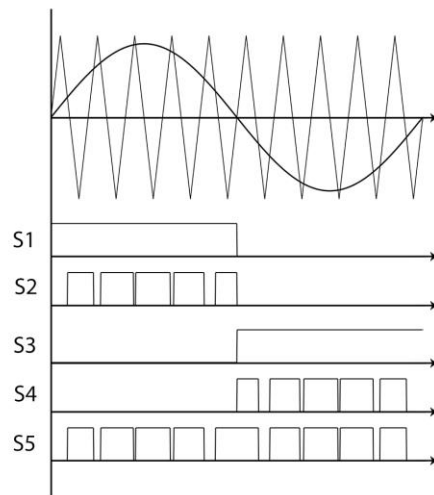
ب



الف

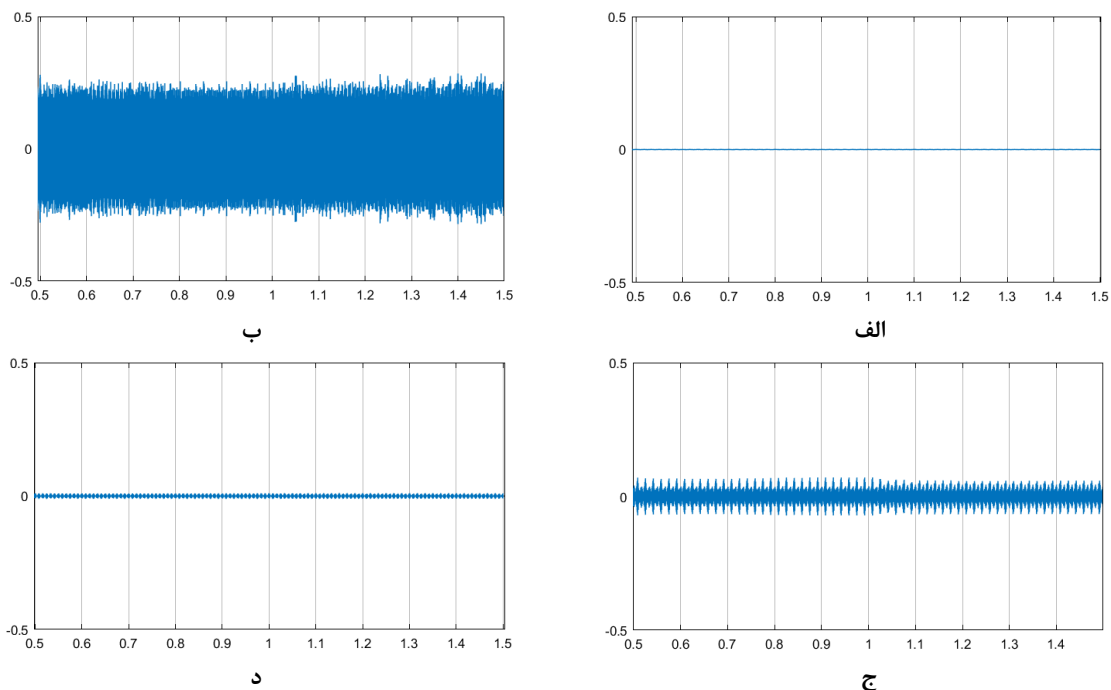


د



ج

شکل (۲-۱۲) نحوه کنترل کلیدها در اینورترهای مختلف الف) کلیدزنی دوقطبی در اینورتر تمام پل
 ب) کلیدزنی تک قطبی در اینورتر تمام پل ج) کلیدزنی تک قطبی در اینورتر H5 د) کلیدزنی تک قطبی در اینورتر
 هر یک



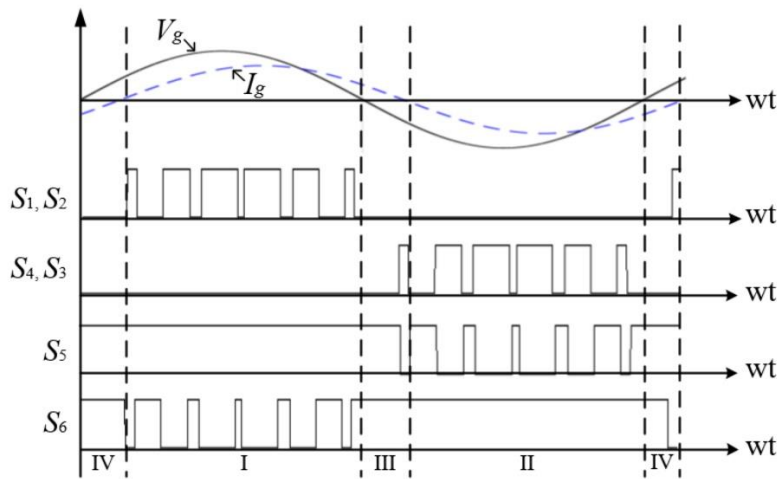
شکل (۲-۱۳) جریان ناشی سامانه فتوولتائیک با بهره‌گیری از اینورترها و روش‌های کلیدزنی مختلف [۲۲]
 الف) اینورتر تمام‌پل و کلیدزنی دوقطبی ب) اینورتر تمام‌پل و کلیدزنی تک‌قطبی
 ج) اینورتر H5 و کلیدزنی تک‌قطبی د) اینورتر هریک و کلیدزنی تک‌قطبی

شکل (۲-۱۳) میزان جریان ناشی سامانه فتوولتائیک را به ازای بهره‌گیری از اینورترها و روش‌های مختلف کلیدزنی نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، استفاده از روش کلیدزنی تک‌قطبی در اینورتر تمام‌پل باعث جاری شدن جریان ناشی شده است اما به‌کارگیری دو ساختار اینورتری H5 و هریک، میزان جریان ناشی را تا حد زیادی کاهش داده است.

بر اساس نتایج ارائه‌شده در مرجع [۲۲]، در صورتی که جریان ناشی در فرایند طراحی سامانه فتوولتائیک اهمیتی نداشته باشد و یا روش‌هایی برای تضعیف آن در نظر گرفته شده باشد، ساختار اینورتری تمام‌پل با روش کلیدزنی تک‌قطبی بهترین بازده با کم‌ترین تعداد کلید نیمه‌هادی را ارائه می‌کند. در صورتی که هم بهترین بازده و هم کم‌ترین میزان جریان ناشی مدنظر باشد، ساختار هریک با روش کلیدزنی تک‌قطبی گزینه مناسبی است. ساختار H5 عملکرد قابل قبولی در بازده و تضعیف جریان ناشی ارائه می‌کند، در حالی که تعداد کلیدهای نیمه‌هادی آن یک مورد کم‌تر از هریک است. این مورد باعث می‌شود تا ساختار H5 اقتصادی‌تر از هریک باشد.

روش کلیدزنی تک‌قطبی مرجع [۲۱] جریان نشستی را کاهش می‌دهد و بازده آن بالاتر از کلیدزنی دوقطبی است اما به دلیل اینکه این روش امکان کار اینورتر را در هر چهار ناحیه توان مهیا نمی‌کند، توان راکتیو در این روش قابل کنترل نیست [۱]. مرجع [۲۳] با ترکیب روش کلیدزنی دوقطبی و تک‌قطبی توانسته است توان راکتیو را کنترل کند اما پیاده‌سازی این روش پیچیده بوده و به دلیل استفاده از روش کلیدزنی دوقطبی در بازه‌هایی از زمان که ولتاژ و جریان پلاریته مختلفی دارند، بازده آن کمتر از روش کلیدزنی تک‌قطبی است [۱].

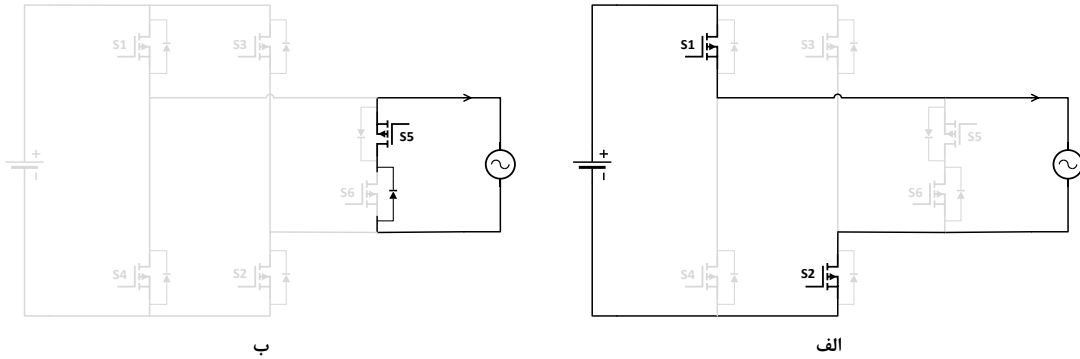
مرجع [۱] یک روش کلیدزنی تک‌قطبی برای اینورتر هر یک ارائه می‌کند که علاوه بر بازده بالا و جریان نشستی پایین، قابلیت کنترل توان راکتیو را نیز داراست. شکل (۲-۱۴) نحوه کلیدزنی کلیدهای مختلف را در اینورتر هر یک نشان می‌دهد. با توجه به وضعیت ولتاژ شبکه v_g و جریان تزریق شده به شبکه i_g چهار ناحیه عملکردی به وجود می‌آید.



شکل (۲-۱۴) نحوه کلیدزنی کلیدهای مختلف اینورتر هر یک [۱]

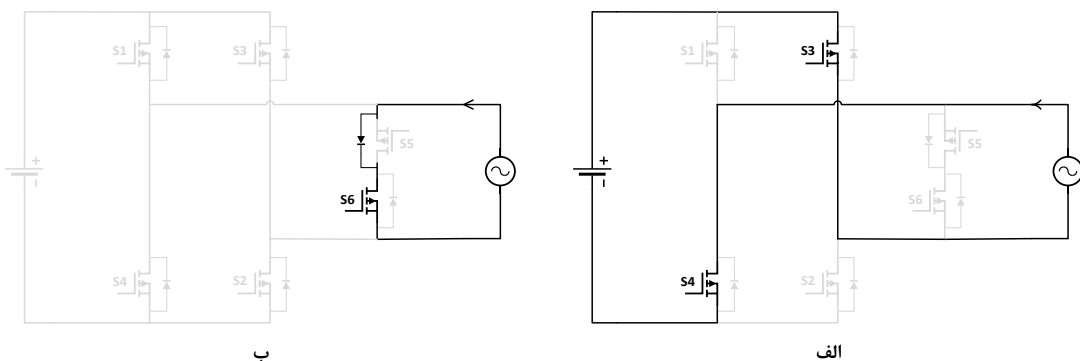
در ناحیه ۱، ولتاژ شبکه و جریان تزریق شده مثبت هستند بنابراین توان مثبت خواهد بود. شکل (۲-۱۵) نحوه کنترل کلیدها در این ناحیه را نشان می‌دهد. در این ناحیه با روشن بودن کلیدهای ۱ و

۲ انرژی به شبکه تزریق می‌شود (شکل (۱۵-۲)-الف) و کلید ۵ و دیود کلید ۶ عمل هرزگرد را انجام می‌دهند (شکل (۱۵-۲)-ب).



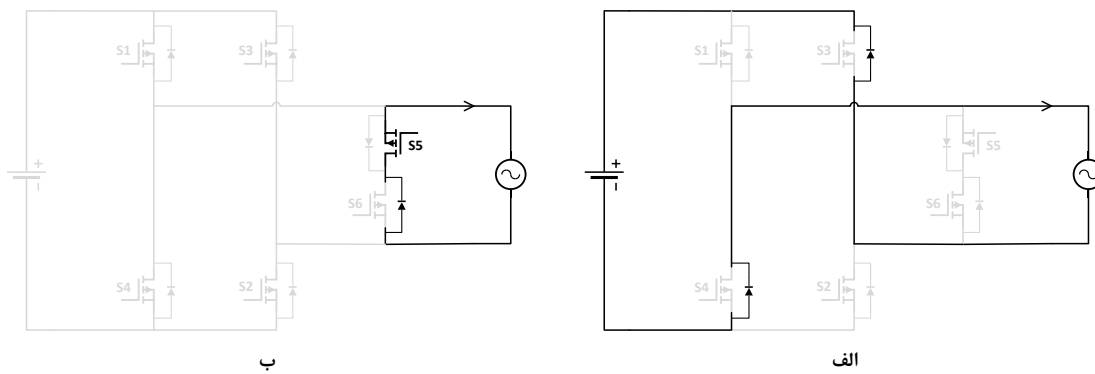
شکل (۱۵-۲) عملکرد اینورتر هریک در ناحیه ۱ [الف] تزریق توان ب) هرزگرد

در ناحیه ۲، ولتاژ شبکه و جریان تزریق شده منفی هستند بنابراین همانند ناحیه ۱ توان نیز در این ناحیه مثبت است. شکل (۱۶-۲) کنترل کلیدها در این ناحیه را نشان می‌دهد. با روشن بودن کلیدهای ۳ و ۴ مطابق شکل (۱۶-۲)-الف انرژی به شبکه تزریق خواهد شد و کلید ۶ و دیود کلید ۵ مطابق شکل (۱۶-۲)-ب عمل هرزگرد را انجام می‌دهند.

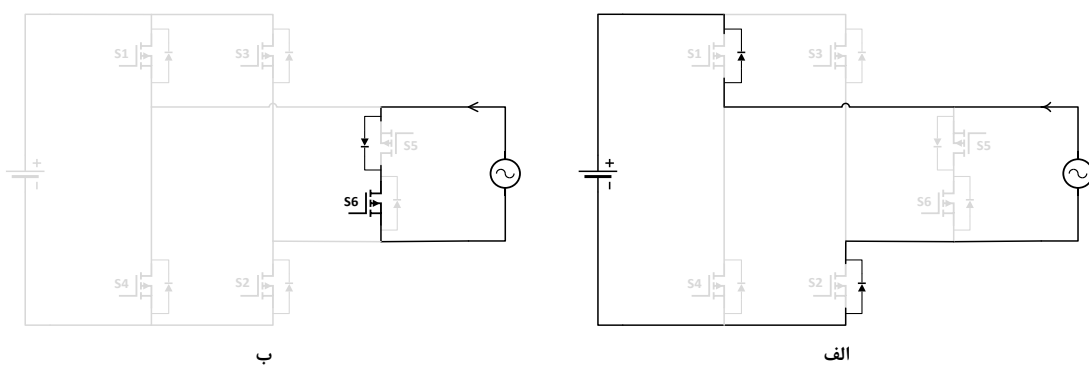


شکل (۱۶-۲) عملکرد اینورتر هریک در ناحیه ۲ [الف] تزریق توان ب) هرزگرد

در ناحیه ۳ پلاریته ولتاژ شبکه و جریان تزریق شده مخالف همدیگر بوده و ولتاژ منفی و جریان مثبت است. شکل (۱۷-۲) الف نحوه کارکرد اینورتر را در ناحیه توان منفی نشان می‌دهد و نحوه کنترل کلیدها در شکل (۱۷-۲) ب باعث ایجاد ولتاژ صفر در این ناحیه می‌شود. در ناحیه ۴ نیز پلاریته ولتاژ و جریان تزریق شده مخالف همدیگر است ولی ولتاژ مثبت و جریان منفی است. شکل (۱۸-۲) الف عملکرد اینورتر در ناحیه توان منفی و شکل (۱۸-۲) ب صفر شدن ولتاژ را نشان می‌دهد.

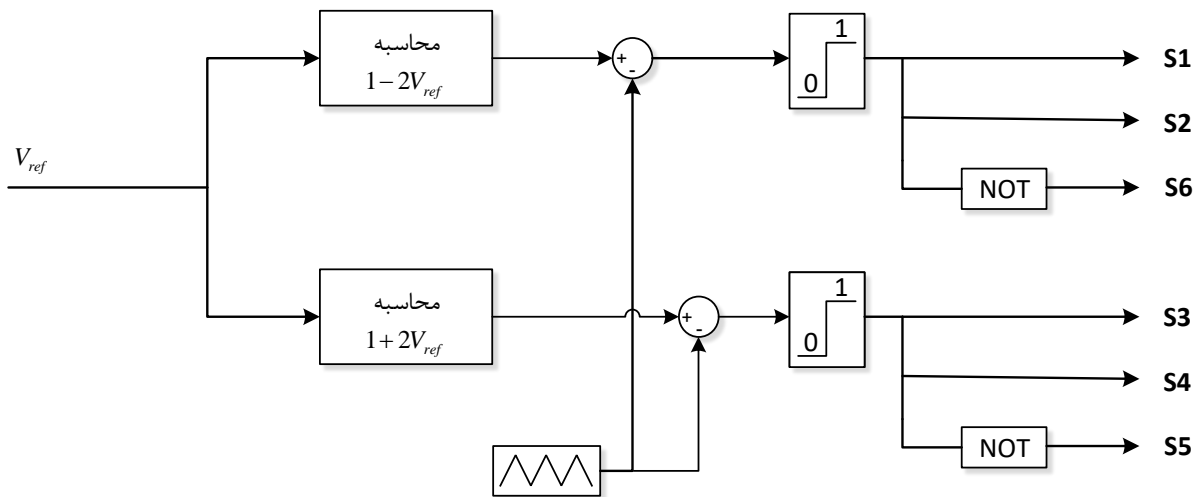


شکل (۱۷-۲) عملکرد اینورتر هر یک در ناحیه ۳ [الف] جذب توان ب) صفر شدن ولتاژ خروجی



شکل (۱۸-۲) عملکرد اینورتر هر یک در ناحیه ۴ [الف] جذب توان ب) صفر شدن ولتاژ خروجی

برای ساخت سیگنال کلیدزنی جهت کنترل کلیدهای اینورتر در ناحیه ۱ تا ۴ از الگوریتم شکل (۱۹-۲) استفاده می‌شود. پس از محاسبه V_{ref} توسط سیستم کنترل، مقادیر $1 - 2V_{ref}$ و $1 + 2V_{ref}$ محاسبه شده و با سیگنال دندان‌اره‌ای مقایسه می‌شود. در صورتی که حاصل بزرگ‌تر از صفر باشد خروجی ۱ و در غیر این صورت خروجی صفر خواهد بود.



شکل (۱۹-۲) ساخت سیگنال کلیدزنی از سیگنال مرجع تولیدشده توسط سیستم کنترل

۲-۵-۵ روش‌های ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT)^۱

بر اساس جدول (۲-۳)، حتی بهترین پنل‌های خورشیدی نیز بازده پایینی دارند. به همین دلیل تمامی توان تولیدی توسط این پنل‌ها ارزشمند است. در بخش ۲-۴ مشخص شد که حداکثر توانی که از یک پنل خورشیدی می‌توان استخراج کرد، به ازای مقادیر خاصی از ولتاژ و جریان خروجی پنل اتفاق می‌افتد. همچنین در این بخش مطرح شد که با تغییر تابش نور خورشید و یا تغییر دمای محیط، مشخصه جریان-ولتاژ پنل تغییر می‌کند. برای استخراج حداکثر توان ممکن از پنل در این شرایط، ولتاژ

^۱ Maximum power point tracking

و یا جریانی که حداکثر توان در آن اتفاق می‌افتد می‌بایست مجدد ردیابی شود. برای ردیابی این جریان یا ولتاژ روش‌هایی ارائه شده است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد

یکی از ساده‌ترین روش‌های ردیابی نقطه حداکثر توان، روش ولتاژ ثابت (CV^1) است. در این روش مقدار ولتاژ خروجی پنل می‌بایست در نزدیکی ولتاژ مرجعی که حداکثر توان بر اساس مشخصه جریان-ولتاژ در آن اتفاق می‌افتد، حفظ شود [۲۴]. هرچند این روش بسیار ساده است اما نمی‌تواند کارایی لازم در هنگام تغییرات توان بر اثر تغییر دما و یا تابش را فراهم آورد [۲۴].

یکی دیگر از روش‌های استخراج حداکثر توان از پنل‌ها، روش انحراف و مشاهده ($P\&O^2$) است. این روش با افزایش یا کاهش مداوم ولتاژ خروجی مبدل بوست و مقایسه توان استخراج‌شده از پنل‌های PV با توان استخراج‌شده در سیکل قبل، حداکثر توان ممکن را استخراج می‌کند [۲۵]. شکل (۲۰-۲) الگوریتم این روش را نمایش می‌دهد. از جمله مزایای این روش سادگی آن، عدم وابستگی به پارامترهای پنل خورشیدی و کارایی خوب در صورت عدم تغییر سریع تابش است؛ اما از طرف دیگر در صورتی که فرکانس انحراف بالا انتخاب شود امکان ایجاد نوسان حول نقطه عملکرد در حالت پایدار وجود دارد [۲۴]. در شکل (۲۰-۲)، $V(t)$ و $I(t)$ به ترتیب ولتاژ و جریان در خروجی پنل‌های خورشیدی می‌باشد. مقادیر مختلف در زمان t ، مربوط به سیکل فعلی و در $t - \Delta t$ مربوط به سیکل قبل هستند.

یکی دیگر از روش‌های ردیابی نقطه حداکثر توان، روش هدایت افزایشی (IC^3) است. در این روش با مقایسه افزایش توان نسبت به افزایش ولتاژ یا افزایش جریان در سیکل قبل، برای دستیابی به نقطه حداکثر توان در ولتاژ تغییر ایجاد می‌شود [۲۵]. شکل (۲۱-۲) الگوریتم این روش را نشان می‌دهد. از جمله مزایای این روش قابلیت مشخص کردن فاصله نسبی و زمان رسیدن به نقطه حداکثر توان، دقت بالا در شرایط آب و هوایی بسیار متغیر و نوسانات کم‌تر حول نقطه حداکثر توان نسبت به P&O است؛

¹ Constant Voltage

² Perturb and Observe

³ Incremental Conductance

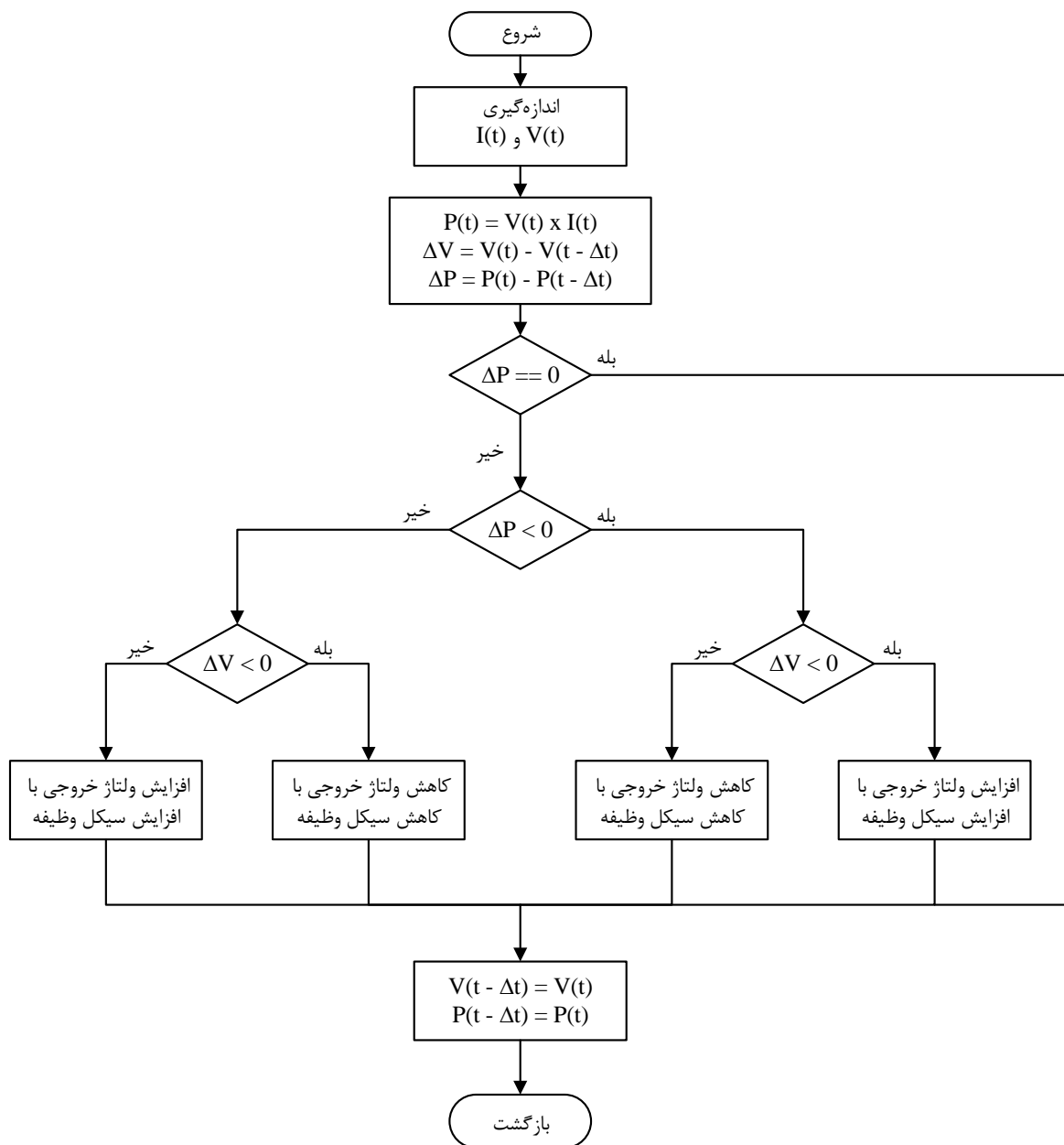
اما از سوی دیگر پیچیدگی بسیار بالا نسبت به روش P&O و احتمال ناپایداری به دلیل وجود مشتق در الگوریتم از معایب این روش هستند [۲۴].

روش‌های دیگری نیز برای ردیابی نقطه حداکثر توان وجود دارد. از جمله این روش‌ها روش دما (^۱T) است که با استفاده از روابط حاکم بر مدل پنل خورشیدی، مقدار ولتاژ در نقطه حداکثر توان را تعیین می‌کند اما این روش علاوه بر اطلاع از مشخصات پنل به حسگر دما نیز احتیاج دارد [۲۴]. روش‌های دیگری همانند تکنیک کنترل منطق فازی (^۲FLC) و تکنیک شبکه عصبی (^۳NN) نیز وجود دارند ولی پیاده‌سازی آن نیاز به توانایی و دانش تخصصی دارد و در غیر این صورت تضمینی برای عملکرد صحیح این تکنیک‌ها وجود ندارد [۲۴].

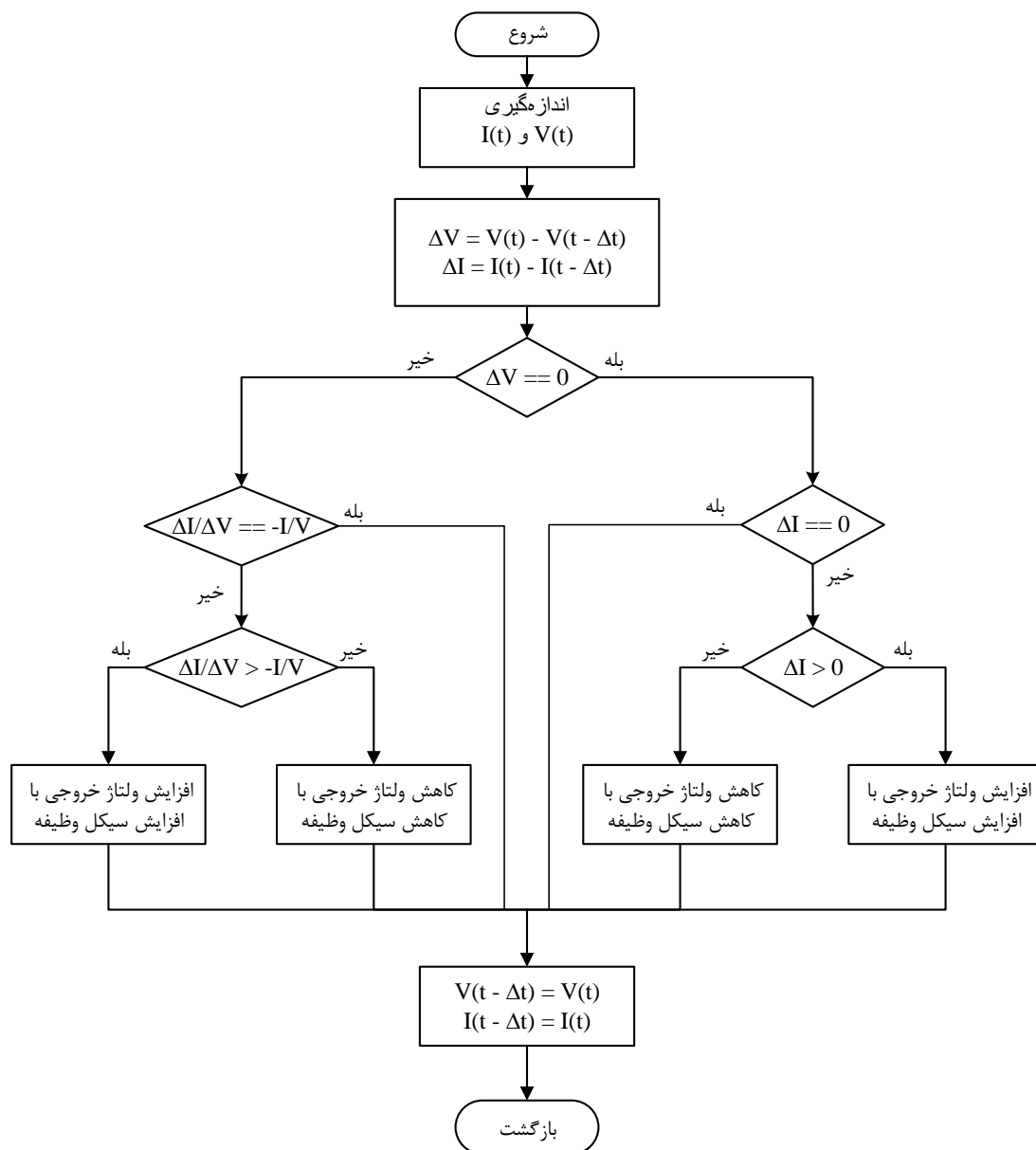
¹ Temperature

² Fuzzy Logic Control

³ Neural Network



شکل (۲-۲۰) الگوریتم P&O [۲۵]



شکل (۲-۲۱) الگوریتم IC [۲۵]

۲-۵-۶ کنترل اینورتر

در سامانه‌های فتوولتائیک سه فاز، استفاده از تبدیل پارک (تبدیل ABC به dq0) یکی از روش‌های رایج کنترل اینورتر است [۲۶]. به کمک این تبدیل، مقادیر سه فاز AC، به سه مؤلفه‌های DC (d, q و 0) تبدیل شده و با استفاده از کنترل کننده PI^۱ مقادیر مرجع خود را دنبال می‌کنند. در نهایت سه مقدار

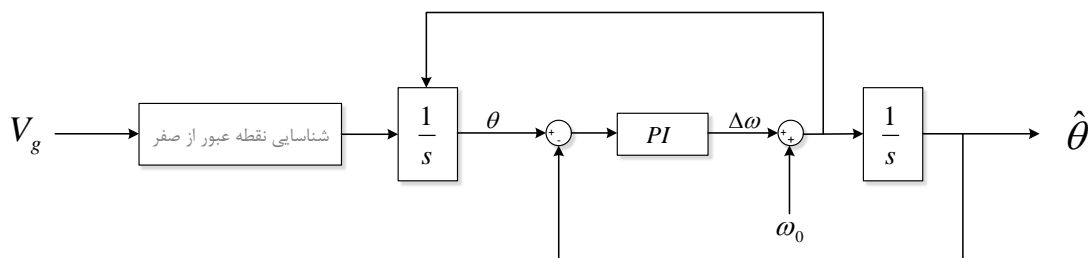
^۱ Proportional-Integral Controller

DC تحت عنوان مؤلفه‌های d ، q و 0 تولید می‌شود که به کمک معکوس تبدیل پارک (تبدیل $dq0$ به ABC) به مقادیر سه فاز و AC تبدیل می‌شوند. این سیگنال‌ها با مقایسه با سیگنال دندان‌اره‌ای، الگوی روشن و یا خاموش شدن کلیدهای اینورتر را تعیین می‌کنند. در سیستم‌های تک‌فاز نیز امکان استفاده از تبدیل پارک وجود دارد اما فرآیند آن نسبت به سیستم‌های سه فاز پیچیده‌تر است. در سیستم کنترل تک‌فاز بر پایه تبدیل پارک، برای ایجاد جریان مرجع DC ، به مؤلفه‌های d و q ولتاژ شبکه و جریان تزریق‌شده نیاز است. برای تولید این مؤلفه‌ها، می‌بایست از یک مولد سیگنال جهت ساخت سیگنالی عمود بر سیگنال اصلی استفاده شود که پیچیدگی سیستم را در پی دارد [۲۷]. راه‌حل این مشکل، استفاده مستقیم از سیگنال‌های سینوسی بدون تبدیل آن‌ها به مقادیر DC است. کنترل‌کننده PI می‌تواند سیگنال سینوسی را دنبال کند اما در این صورت فرکانس کلیدزنی می‌بایست بسیار بالا (مثلاً 200 kHz) انتخاب شود که این کار موجب تلفات کلیدزنی بالا در کلیدها می‌شود؛ بنابراین برای دنبال کردن سیگنال مرجع سینوسی توسط کنترل‌کننده می‌بایست از یک کنترل‌کننده با مرتبه بالاتر استفاده کرد [۱۷]. از جمله پرکاربردترین کنترل‌کننده‌ها برای دنبال کردن سیگنال‌های سینوسی، کنترل‌کننده PR است که با فراهم کردن بهره بی‌نهایت (در مدل ایده‌آل) در فرکانس پایه، امکان دنبال کردن سیگنال‌های سینوسی را فراهم می‌کند [۲۷].

در سیستم‌های متصل به شبکه، وجود حلقه قفل فاز (PLL)^۱ برای سنکرون سازی خروجی سامانه با شبکه ضروری است. در سیستم کنترل سامانه فتوولتائیک متصل به شبکه نیز برای سنکرون کردن خروجی اینورتر با شبکه می‌بایست از یک PLL استفاده شود. به‌طور کلی PLL ، ولتاژ شبکه AC اندازه‌گیری شده را به‌عنوان ورودی دریافت کرده و به‌عنوان خروجی، فرکانس شبکه (ω_g) و زاویه فاز (θ) را تخمین می‌زند. بنابراین PLL یک سیستم حلقه بسته است که خطای بین فاز خروجی و فاز مرجع را به حداقل می‌رساند.

¹ Proportional-Resonant Controller

² Phase Locked Loop



شکل (۲-۲۲) بلوک دیاگرام یک PLL با استفاده از روش شناسایی گذر از صفر [۲۸]

یکی از روش‌های معمول برای دنبال کردن سیگنال، روش شناسایی گذر از صفر^۱ است. در شکل (۲-۲۲) یک PLL با استفاده از روش شناسایی گذر از صفر ارائه شده است [۲۸]. در این روش هنگامی که سیگنال ورودی (در اینجا ولتاژ شبکه v_g) در هنگام عبور از صفر از مقادیر منفی وارد مقادیر مثبت می‌شود، مقدار θ صفر می‌شود. اگر سیگنال ورودی در هنگام عبور از صفر از مقادیر مثبت به مقادیر منفی وارد شود، θ برابر π انتخاب می‌شود. در این روش در هر سیکل از سیگنال ورودی فقط در دو نقطه شناسایی صورت می‌گیرد در نتیجه عملکرد دینامیکی این PLL مناسب نیست. به‌علاوه این نوع PLL در مقابل اعوجاج‌ها و هارمونیک‌های سیگنال ورودی حساس است. با توجه به معایبی که این PLL دارد از آن نمی‌توان برای سنکرون سازی اینورتر سامانه PV استفاده کرد.

مرجع [۲۹] ساختار دیگری از PLL برای استفاده در اینورتر متصل به شبکه ارائه می‌کند که در شکل (۲-۲۳) نمایش داده شده است. این ساختار از یک قسمت برای شناسایی فاز (PD^۲)، یک کنترل‌کننده PI با پهنای باند پایین بر پایه فیلتر حلقه (LF^۳) و یک نوسان‌ساز کنترل‌شده با ولتاژ (VCO^۴) تشکیل شده است. قسمت شناسایی فاز (PD) برای شناسایی تفاوت فاز بین سیگنال ورودی و سیگنال تولیدشده خروجی استفاده می‌شود. فیلتر حلقه (LF) مؤلفه‌هایی با فرکانس بالاتر یا پایین‌تر

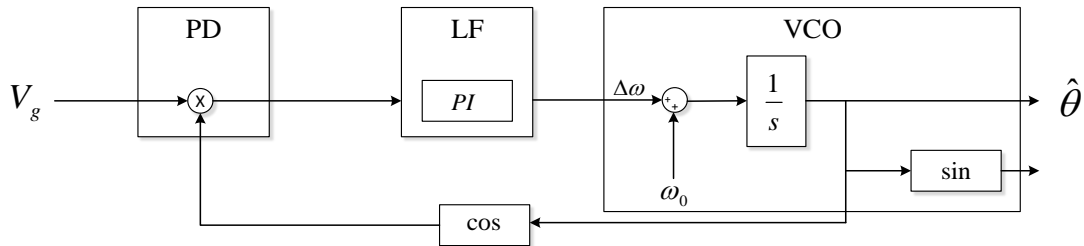
¹ Zero-Crossing Detection

² Phase Detection

³ Loop Filter

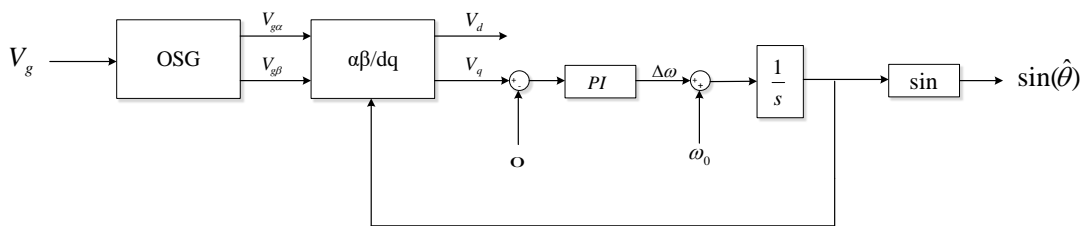
⁴ Voltage Controlled Oscillator

از فرکانس شبکه که در خروجی PD ظاهر می‌شوند را فیلتر می‌کنند و کنترل‌کننده PI فرکانس را تخمین می‌زند.

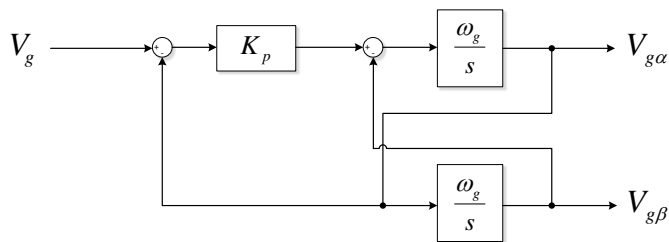


شکل (۲-۲۳) PLL پیشنهادی در مرجع [۲۹]

یکی دیگر از روش‌های پیاده‌سازی PLL، استفاده از دستگاه مرجع دوار است. بلوک دیاگرام PLL مرجع [۳۰] که در شکل (۲-۲۴) نشان داده شده است، از یک مولد سیگنال عمودی (OSG^۱)، تبدیل پارک (تبدیل $\alpha\beta$ به dq)، یک جبران ساز PI با پهنای باند پایین و نوسان‌ساز کنترل‌شده با ولتاژ (VCO) تشکیل شده است.



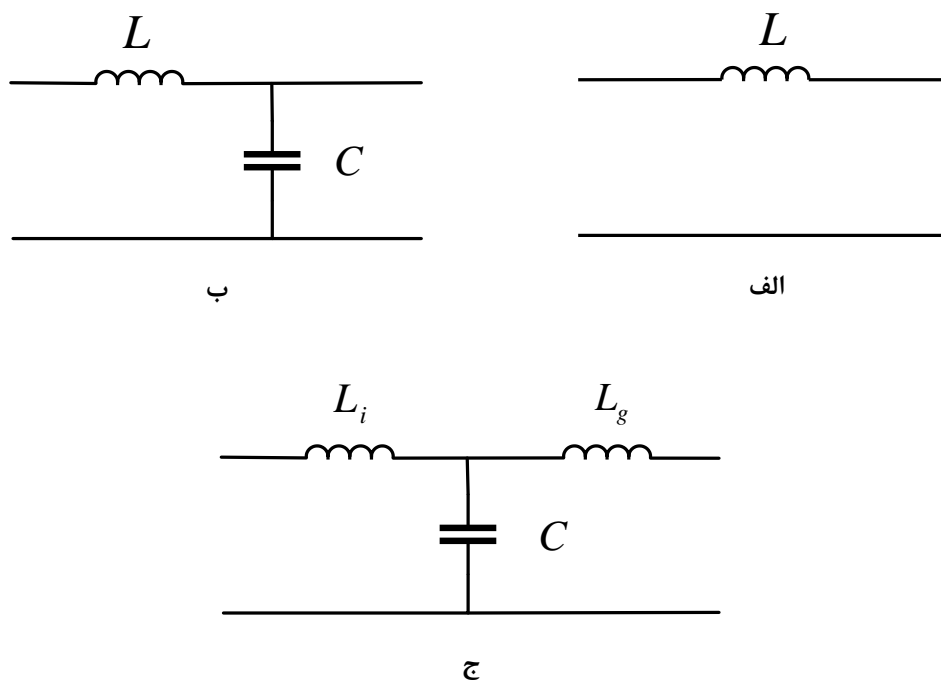
الف



ب

شکل (۲-۲۴) PLL ارائه‌شده در مرجع [۳۰] بر اساس دستگاه مرجع دوار (الف) شمای کلی (ب) بلوک OSG

^۱ Orthogonal Signal Generator



شکل (۲-۲۵) انواع مختلف فیلتر جهت تضعیف هارمونیک‌های فرکانس بالای جریان
 الف) فیلتر L ب) فیلتر LC ج) فیلتر LCL

۷-۵-۲ تضعیف هارمونیک‌های جریان خروجی اینورتر

جریان خروجی اینورتر شامل هارمونیک‌های فرکانس بالایی است که تحت فرآیند کلیدزنی به آن تزریق می‌شود. مطابق با استاندارد ۱۱۸۵۹، هارمونیک‌های موجود در جریان تزریق شده به شبکه می‌بایست تضعیف شوند تا در نهایت میزان اعوجاج هارمونیک کل (THD) کم‌تر از ۵ درصد باشد. سه نوع فیلتر L، LC و LCL از جمله فیلترهایی هستند که عمل تضعیف هارمونیک‌های فرکانس بالا در خروجی اینورتر را انجام می‌دهند.

شکل (۲-۲۵) الف شمای کلی فیلتر L را نمایش می‌دهد. این فیلتر فقط از یک سلف تشکیل شده است؛ در نتیجه به منظور این که سطح هارمونیک‌ها منطبق با استاندارد باشد، مقدار سلف می‌بایست بزرگ انتخاب شود. افت ولتاژ قابل ملاحظه‌ای که به دلیل مقدار بالای سلف فیلتر رخ می‌دهد، سبب بد شدن دینامیک سیستم می‌شود [۳۱].

فیلتر LC، که شمای آن در شکل (۲-۲۵) ب نمایش داده شده است، یک فیلتر مرتبه دوم است. طراحی این سلف ساده است و با افزایش ظرفیت خازنی می توان از مقدار و در نتیجه قیمت سلف کاست. با این وجود، این امر می تواند باعث جاری شدن جریان راکتیو بالا در خازن گردد. این فیلتر به دلیل ابعاد فشرده و عملکرد خوب، در اینورترهای مستقل از شبکه استفاده می شود [۳۱].

شکل (۲-۲۵) ج شمای فیلتر LCL را نمایش می دهد. این فیلتر مرتبه سه، به دلیل تضعیف بالای هارمونیک هایی با فرکانس زیر فرکانس رزونانس فیلتر، به صورت گسترده در اینورترهای متصل به شبکه استفاده می شود. در طراحی این فیلتر، فرکانس رزونانس و ریپل جریان جاری شده در سلف ها دو عامل تأثیرگذار بر روی پارامترهای فیلتر می باشد [۳۱].

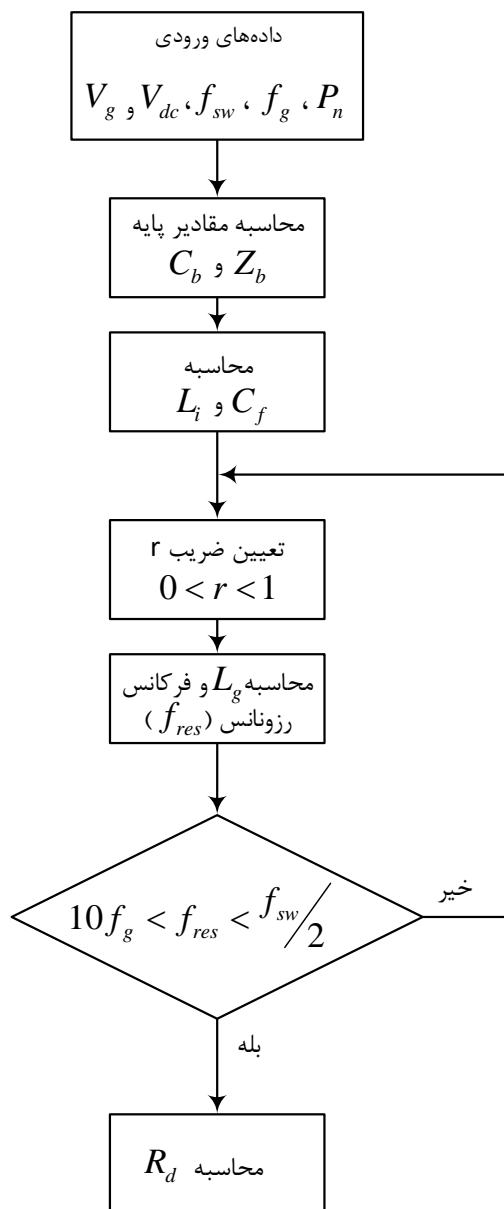
مرجع [۳۱] الگوریتمی برای طراحی فیلتر LCL ارائه می کند که در شکل (۲-۲۶) نمایش داده شده است. پارامترهای لازم برای طراحی فیلتر عبارتند از: ولتاژ مؤثر شبکه (V_g)، توان اکتیو نامی مولد فتوولتائیک (P_n)، ولتاژ لینک DC (V_{dc})، فرکانس شبکه (f_g) و فرکانس کلیدزنی (f_{sw}). ابتدا مقادیر پایه امپدانس و ظرفیت خازنی از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$Z_b = \frac{V_g^2}{P_n} \quad (۲-۱۳)$$

$$C_b = \frac{1}{\omega_g Z_b} \quad (۲-۱۴)$$

برای طراحی خازن موازی در فیلتر LCL، بیشترین میزان تغییرات ضریب توان لحاظ می شود. بر اساس مرجع [۳۱] این تغییرات ۵ درصد لحاظ می شود. در نتیجه ظرفیت خازن از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$C_f = 0.05 \times C_b \quad (۲-۱۵)$$



شکل (۲۶-۲) الگوریتم طراحی فیلتر LCL [۳۱]

رابطه (۱۶-۲) حداکثر ریپل جریان عبوری از سلف را نمایش می‌دهد. این مقدار ۱۰ درصد دامنه جریان خروجی در نظر گرفته می‌شود. در نهایت با توجه به رابطه (۱۶-۲)، میزان سلف سمت اینورتر از رابطه (۱۷-۲) محاسبه می‌شود.

$$\Delta I_{L-max} = 0.1 \times \frac{\sqrt{2}P_n}{V_g} \quad (۱۶-۲)$$

$$L_i = \frac{2 V_{dc}}{3 f_{sw} \Delta I_{L-max}} (1 - m) m \quad (17-2)$$

در این رابطه m ضریب مدولاسیون اینورتر^۱ می باشد. مقدار سلف سمت شبکه برابر است با:

$$L_g = r \times L_i \quad (18-2)$$

که در این رابطه r نسبت بین سلف سمت شبکه و سلف سمت اینورتر است و مقدار آن به گونه ای بین صفر تا یک تعیین می شود که فرکانس رزونانس که از رابطه (۱۹-۲) محاسبه می شود در محدوده مجاز رابطه (۲۰-۲) باشد.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i L_g C_f}} \quad (19-2)$$

$$10f_g < f_{res} < \frac{f_{sw}}{2} \quad (20-2)$$

همان طور که قبلاً بیان شد، قطبهای رزونانسی فیلتر ممکن است باعث ناپایداری سیستم شوند. با استفاده از مقاومت میرا کننده می توان این مشکل را حل کرد. رابطه زیر مقدار این مقاومت را تعیین می کند:

$$R_d = \frac{1}{3\omega_{res} C_f} \quad (21-2)$$

۲-۶ کنترل توان راکتیو

در گذشته، قوانین کشورهای مختلف منابع تولید پراکنده را به کار کردن در محدوده ضریب توان واحد مجبور می کردند [۳۲] اما پتانسیل این منابع برای جبران سازی توان راکتیو، کشورها را بر آن

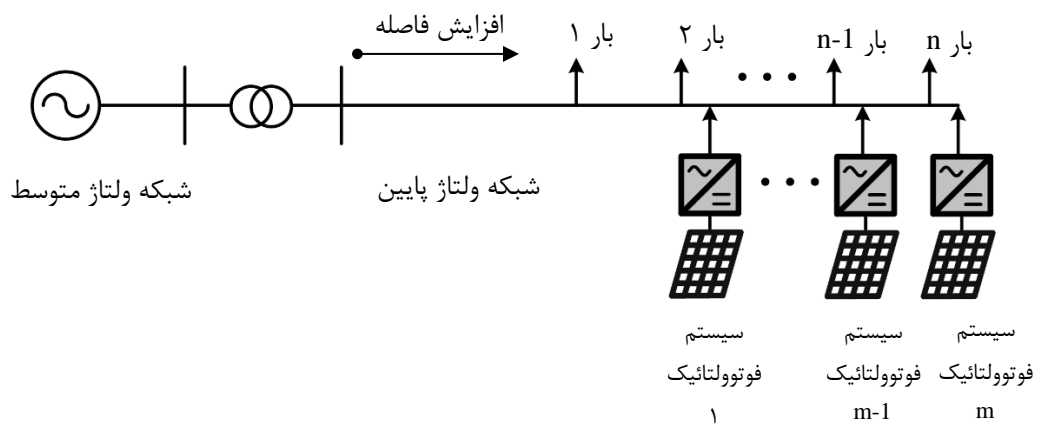
¹ Inverter modulation factor

داشت تا در قوانین خود تجدیدنظر کنند. در استاندارد ۱۱۸۵۹ ملی ایران که با تأکید بر استانداردهای IEC در سال ۱۳۸۸ نگارش شده است، این مورد مدنظر قرار گرفته است. بر اساس این استاندارد، سامانه PV متصل به شبکه به صورت معمول می‌بایست در ضریب توان واحد کار کند مگر این که برای اهداف جبران سازی توان راکتیو سازگار شده باشد. در این صورت با کسب مجوز از شبکه توزیع می‌تواند به کنترل توان راکتیو مبادرت ورزد.

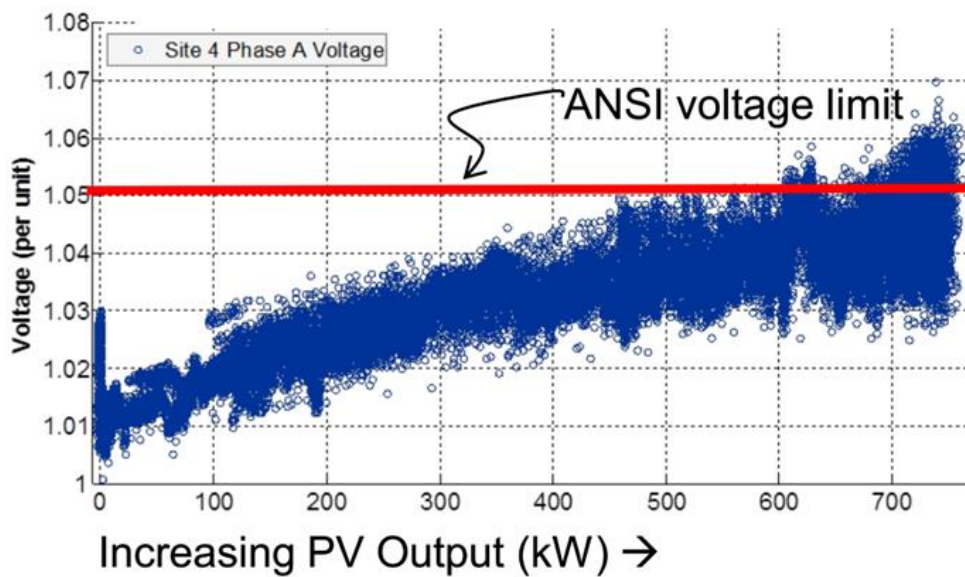
در شبکه‌های توزیع، با افزایش فاصله از ترانسفورماتور قدرت، ولتاژ شبکه به دلیل افزایش بارهای متصل به شبکه و همچنین تلفات خط، نسبت به مقدار نامی آن کاهش می‌یابد. اتصال منابع تولید پراکنده مانند سامانه‌های فتوولتائیک در محلی مناسب می‌تواند افت ولتاژ را جبران نماید. اما ممکن است به دلیل محدودیت توان خروجی این مولدها، تمامی افت ولتاژ جبران نشود. در این صورت مولدهایی که امکان کنترل توان راکتیو را دارا هستند می‌توانند با تزریق توان راکتیو به شبکه، همانند یک بانک خازنی و یا فیلتر اکتیو، بخش دیگری از افت ولتاژ را جبران نمایند. بنابراین توانمندسازی این مولدها به کنترل توان راکتیو می‌تواند بسیار مفید باشد.

به دلیل حمایت دولت‌ها از انرژی‌های نو، نفوذ بالای این سامانه‌ها در شبکه توزیع دور از انتظار نیست. شکل (۲-۲۷) شمایی از یک شبکه توزیع در حضور تعداد بالایی از سامانه‌های فتوولتائیک را نشان می‌دهد. افزایش تمرکز سامانه‌های فتوولتائیک در شبکه، وقوع اضافه ولتاژ در شبکه را محتمل می‌کند؛ شکل (۲-۲۸) [۳۳]. بنابراین با افزایش نفوذ این سامانه‌ها، چالش خروج ولتاژ از محدوده مجاز به مسئله مهمی بدل خواهد شد. اگرچه می‌توان با کاهش توان خروجی سامانه‌ها این مشکل را رفع کرد [۳۴] اما در صورتی که این مشکل مقطعی باشد کاهش توان خروجی می‌تواند به ضرر صاحبان مولدها باشد. راه‌حل این مشکل، جبران‌سازی شبکه است و از آنجاکه اینورتر می‌تواند کنترل توان راکتیو را کنترل کند، سامانه‌های فتوولتائیک بهترین گزینه برای رفع مشکلی هستند که خودشان در آن دخیل‌اند.

بر اساس مطالبی که بیان شد، امکان کنترل توان راکتیو توسط سامانه فتوولتائیک مفید خواهد بود. میزان توان راکتیوی که می‌بایست توسط سامانه فتوولتائیک کنترل شود، با توجه به شرایط شبکه تعیین می‌گردد. در ادامه بخش به نحوه تعیین این توان پرداخته می‌شود.



شکل (۲-۲۷) شمایی از تمرکز بالای سامانه‌های فتوولتائیک در شبکه توزیع



شکل (۲-۲۸) تأثیر توان خروجی سامانه PV بر روی ولتاژ شبکه [۳۳]

برای جبران‌سازی شبکه، سامانه فتوولتائیک می‌بایست مقدار مشخصی توان راکتیو به شبکه تزریق و یا از شبکه مصرف نماید. به‌طور کلی این مقدار می‌تواند به یکی از دو صورت زیر تعیین و به سیستم کنترل سامانه فتوولتائیک ارسال شود:

(۱) **تعیین توان راکتیو مرجع توسط مرکز کنترل:** در این روش، مرکز کنترل با استفاده

از داده‌های اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف شبکه، پخش بار را انجام داده و میزان توان راکتیوی که سامانه PV می‌بایست کنترل کند را برای آن ارسال می‌کند.

(۲) **تعیین توان راکتیو مرجع با توجه به ولتاژ شبکه در نقطه PCC:** در این روش،

سامانه PV ولتاژ شبکه در نقطه اتصال را به‌صورت مداوم تحت نظر قرار می‌دهد و در صورتی که اضافه ولتاژ و یا افت ولتاژی در نقطه اتصال تشخیص دهد به تزریق یا مصرف توان راکتیو می‌پردازد.

از آنجاکه مرکز کنترل دید بهتری از وضعیت شبکه دارد، اولویت آن برای تعیین میزان توان راکتیوی که سامانه PV می‌بایست کنترل کند، بیشتر است. در صورتی که امکان استفاده از داده‌های مرکز کنترل وجود نداشته باشد، روش دوم می‌تواند به کنترل توان راکتیو در شبکه بپردازد. در ادامه فصل روش‌های ذکر شده بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۶-۱ تعیین توان راکتیو مرجع توسط مرکز کنترل

مرکز کنترل با مانیتورینگ شبکه و انجام پخش بار می‌تواند وضعیت لحظه‌ای آن را پایش کند. با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبات پخش بار، وضعیت لحظه‌ای پارامترهای شبکه مانند ولتاژ، توان اکتیو و توان راکتیو جاری شده در خطوط و باس‌های مختلف مشخص می‌شود. مرکز کنترل می‌تواند با استفاده از این داده‌ها، میزان توان راکتیو موردنیاز را به منابع تولید پراکنده ارسال کند. اگرچه روش‌های زیادی برای چگونگی محاسبه توان راکتیو مرجع و ارسال آن به سامانه فتوولتائیک ارائه شده

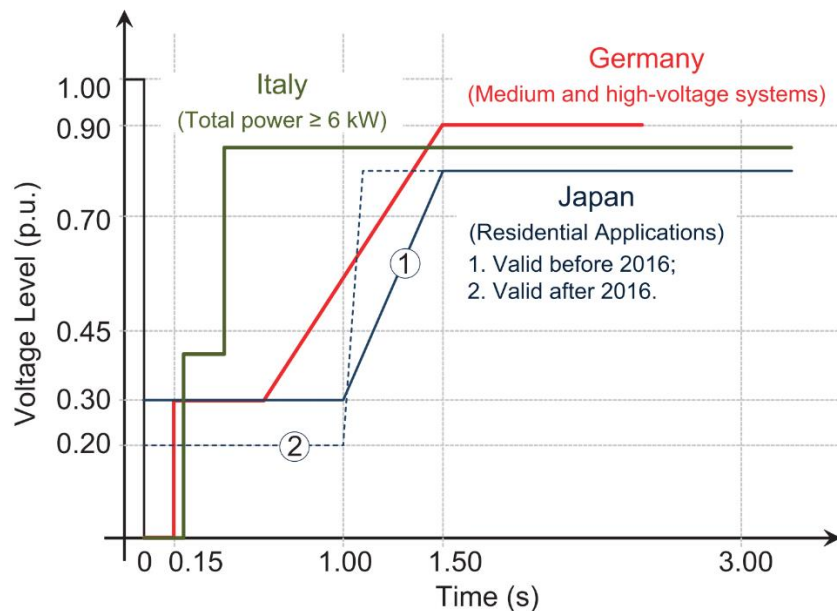
است [۳۲، ۳۵-۳۸] ولی در این پایان نامه چگونگی این محاسبه و یا نحوه ارتباط با سامانه PV مورد مطالعه نیست.

۲-۶-۲ تعیین توان راکتیو مرجع با توجه به ولتاژ شبکه در نقطه PCC

در صورتی که ولتاژ شبکه خارج از محدوده مجاز تعیین شده توسط استاندارد شبکه باشد، افت ولتاژ و یا اضافه ولتاژ رخ می دهد. در بخش قبل درباره کنترل این وضعیت توسط مرکز کنترل بحث شد، اما در صورتی که امکان استفاده از داده های مرکز کنترل وجود نداشته باشد سامانه PV می تواند با استفاده از تغییرات ولتاژ شبکه در نقطه اتصال به کنترل توان راکتیو بپردازد. در مرجع [۳۹] سه استراتژی برای تعیین میزان توان راکتیوی که سامانه PV در وضعیت افت ولتاژ یا اضافه ولتاژ باید تزریق و یا مصرف نماید ارائه شده است. در روش های ارائه شده، ولتاژ شبکه در نقطه اتصال به صورت دائم مورد ارزیابی قرار می گیرد و در صورتی که در محدوده مجاز قرار نداشته باشد، توان راکتیو مرجع محاسبه شده و در اختیار سیستم کنترل اینورتر قرار می گیرد. در استفاده از این روش ها دو نکته مهم وجود دارد. نخست اینکه کنترل توان راکتیو توسط سامانه PV در چنین وضعیتی می بایست از طرف شبکه توزیع مجاز شناخته شده باشد. نکته دوم این است که بر اساس مرجع [۳۹]، در صورتی که چنین وضعیتی به وجود آید، سامانه PV فقط در بازه زمانی محدودی می تواند عمل تزریق و یا مصرف توان راکتیو را انجام دهد. در صورتی که قبل از اتمام این زمان مشکل شبکه رفع شد، سامانه PV به وضعیت کارکرد عادی خود برمی گردد؛ در غیر این صورت، سامانه PV می بایست از شبکه جدا شود. مقدار این بازه زمانی توسط قوانین شبکه تعریف می شود. شکل (۲-۲۹) نحوه عملکرد سامانه فتوولتائیک در هنگام بروز فلش ولتاژ^۱ در چند کشور مختلف را نشان می دهد. برای مثال در کشور آلمان در صورتی که فلش ولتاژی کم تر از ۳۰ درصد ولتاژ نامی رخ دهد، مولد تولید پراکنده می بایست ظرف مدت ۰/۱۵ ثانیه از شبکه خارج شود. همچنین در صورت وقوع فلش ولتاژی با مقدار ۳۰ تا ۹۰ درصد ولتاژ نامی، مولد می تواند زمان بیشتری

^۱ Voltage sag

به شبکه متصل بماند اما در این مدت می‌بایست توان راکتیو به شبکه تزریق نماید. در حال حاضر کشورهایی که چنین قوانینی را در شبکه توزیع خود لحاظ کرده‌اند محدود است ولی با افزایش نفوذ سامانه‌های فتوولتائیک، وجود چنین قوانینی می‌تواند برای شبکه سودمند باشد [۳۹].

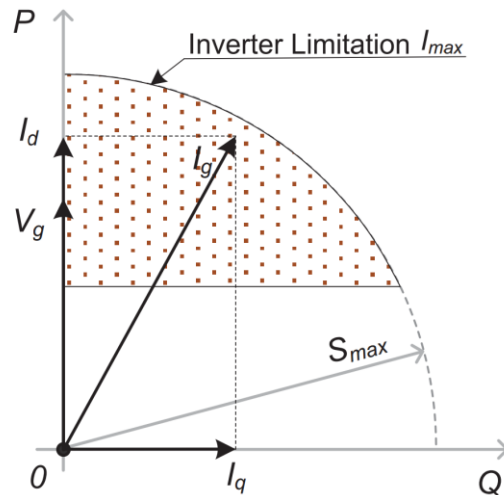


شکل (۲-۲۹) نحوه رفتار مولدهای تولید پراکنده متصل به شبکه در کشورهای مختلف در صورت وقوع فلش ولتاژ [۳۴]

اساس روش‌های ارائه‌شده در مرجع [۳۹] بر پایه اندازه ولتاژ شبکه در نقطه اتصال است به طوری که اگر ولتاژ شبکه در این نقطه کم‌تر از حد مجاز باشد (با توجه به قوانین شبکه)، سامانه PV برای کمک به پایداری شبکه به تزریق توان راکتیو می‌پردازد. بر اساس مرجع [۳۹] ارتباط بین میزان جریان راکتیو تزریقی با ولتاژ شبکه به صورت زیر است:

$$k = \frac{I_q / I_N}{1 - V_g} \quad (2-22)$$

در این رابطه جریان راکتیو تزریق شده به شبکه، I_N جریان نامی سامانه PV و V_g ولتاژ شبکه برحسب پریونیت می باشد. مقدار k می بایست حداقل ۲ در نظر گرفته شود [۳۹]. برای مثال اگر افت ولتاژ برابر ۰/۱ پریونیت باشد و k برابر ۲ انتخاب شود، جریان راکتیو تزریقی حداقل باید ۲۰٪ جریان نامی باشد.



شکل (۲-۳۰) استراتژی توان اکتیو متوسط ثابت برای تعیین میزان توان مرجع اکتیو و راکتیو [۳۴]

سه استراتژی که برای تعیین جریان های اکتیو و راکتیو در مرجع [۳۹] ارائه شده اند عبارتند از:

(۳) توان اکتیو متوسط ثابت

(۴) جریان اکتیو ثابت

(۵) پیک جریان ثابت

در استراتژی توان اکتیو متوسط ثابت سعی می شود توان اکتیو در بازه های زمانی کوتاه ثابت باقی بماند. شکل (۲-۳۰) نمایی از رابطه پارامترهای مختلف با یکدیگر را نشان می دهد. در صورتی که مقدار پریونیت ولتاژ شبکه در محدوده $0.9 < V_g \leq (1 - \frac{1}{k})$ باشد، مقادیر جریان مرجع اکتیو و راکتیو از رابطه (۲-۲۳) محاسبه می شود.

$$\begin{cases} I_d = \frac{I_N}{V_g} \\ I_q = k(1 - V_g) I_N \end{cases} \quad (23-2)$$

در این رابطه I_d جریان اکتیو، I_q جریان راکتیو و V_g ولتاژ شبکه است. تمامی این مقادیر برحسب پریونیت می‌باشند. بر اساس این روش، در صورتی که شبکه با افت ولتاژ مواجه شود، با توجه به رابطه $P = \frac{1}{2} V_{gm} I_d$ ، با افزایش جریان تزریقی، توان در بازه‌های زمانی کوتاه ثابت می‌ماند. در صورتی که ولتاژ شبکه کم‌تر از $(1 - \frac{1}{k})$ پریونیت باشد، جریان‌های اکتیو و راکتیو به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} I_d = \frac{I_N}{V_g} \\ I_q = I_N \end{cases} \quad (24-2)$$

برای جلوگیری از تجاوز جریان عبوری از کلیدها از محدوده مجاز آن و در نتیجه جلوگیری از آسیب

رسیدن به آن‌ها، مقادیر I_d و I_q در رابطه (23-2) می‌بایست در $\frac{1}{V_g} \sqrt{1 + k^2(V_g - V_g^2)^2} \leq \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}}{I_N}$

صدق کند. همچنین در رابطه (24-2) برای حفاظت از کلیدها باید $\frac{1}{V_g} \sqrt{1 + V_g^2} \leq \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}}{I_N}$ برقرار باشد.

به ازای بعضی از مقادیر جریان اکتیو و راکتیو، نامساوی‌های ذکر شده برقرار نمی‌شود؛ در نتیجه در این استراتژی خطر تجاوز جریان عبوری از کلیدها و آسیب رسیدن به آن‌ها وجود دارد.

در استراتژی جریان اکتیو ثابت، مؤلفه اکتیو جریان تزریقی به شبکه برابر با جریان نامی سامانه PV

در نظر گرفته می‌شود. تفاوت این استراتژی با استراتژی توان اکتیو متوسط ثابت این است که اگر افت

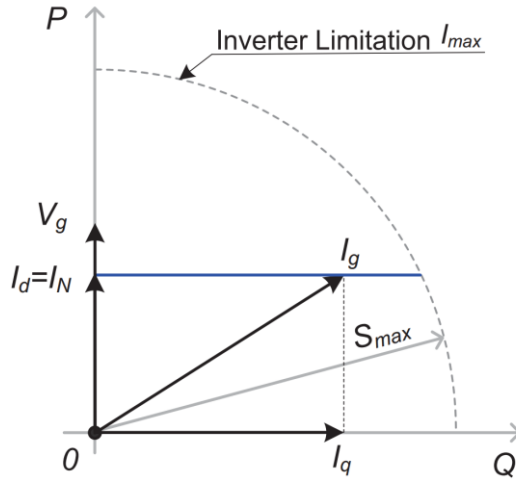
ولتاژ رخ دهد، توان اکتیو تزریقی در این روش کم‌تر از روش اول خواهد بود؛ به همین دلیل در این

روش خطر تجاوز جریان عبوری از کلیدها از مقدار مجاز نسبت به روش قبل کم‌تر است. شکل (2-31)

روابط بین پارامترهای مختلف در این استراتژی را نشان می‌دهد. در صورتی که ولتاژ شبکه در محدوده

$(1 - \frac{1}{k}) \leq V_g < 0.9$ پریونیت باشد، مقادیر جریان اکتیو و راکتیو به صورت رابطه (25-2) خواهد بود.

$$\begin{cases} I_d = I_N \\ I_q = k(1 - V_g) I_N \end{cases} \quad (25-2)$$



شکل (۲-۳۱) استراتژی جریان اکتیو ثابت برای تعیین میزان توان مرجع اکتیو و راکتیو [۳۴]

و در صورتی که ولتاژ شبکه کم‌تر از $(1 - \frac{1}{k})$ پریونیت باشد، جریان‌های اکتیو و راکتیو به صورت زیر است:

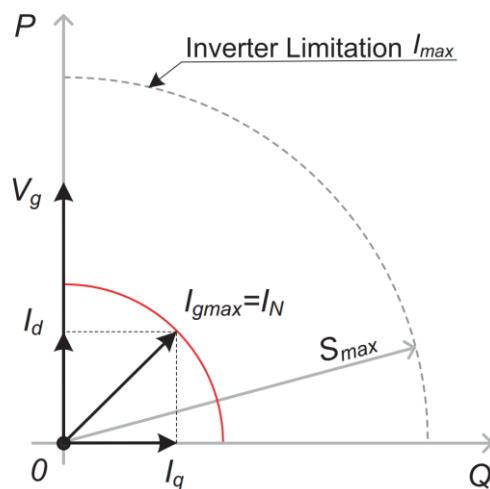
$$\begin{cases} I_d = I_N \\ I_q = I_N \end{cases} \quad (26-2)$$

برای جلوگیری از آسیب رسیدن به کلیدها، مقدار مؤلفه‌های جریان در رابطه (۲-۲۵) باید در

$$\frac{1}{V_g} \sqrt{1 + V_g^2} \leq \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}}{I_N} \quad \text{باشد. در رابطه (۲-۲۶) نیز باید} \quad \sqrt{1 + k^2(1 - V_g)^2} \leq \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}}{I_N}$$

برقرار باشد. در این استراتژی به ازای برخی مقادیر جریان ممکن است نامساوی‌های ذکر شده برقرار نباشند در نتیجه در این استراتژی نیز ممکن است جریان عبوری از کلیدها بالاتر از مقدار مجاز آن باشد.

در استراتژی سوم، جریان اکتیو و راکتیو طوری تعیین می‌شود که از مقدار مجاز عبوری از کلیدها I_{max} تجاوز نکند. هرچند در این استراتژی ممکن است میزان توان‌های اکتیو و راکتیو تزریق شده به ازای مقادیر یکسان از ولتاژ شبکه، نسبت به دو استراتژی قبل کم‌تر باشد، اما همواره محدوده مجاز برای جریان عبوری از کلیدها رعایت می‌شود. شکل (۳۲-۲) روابط بین پارامترهای مختلف در این استراتژی را نشان می‌دهد.



شکل (۳۲-۲) استراتژی پیک جریان ثابت برای تعیین میزان توان مرجع اکتیو و راکتیو [۳۴]

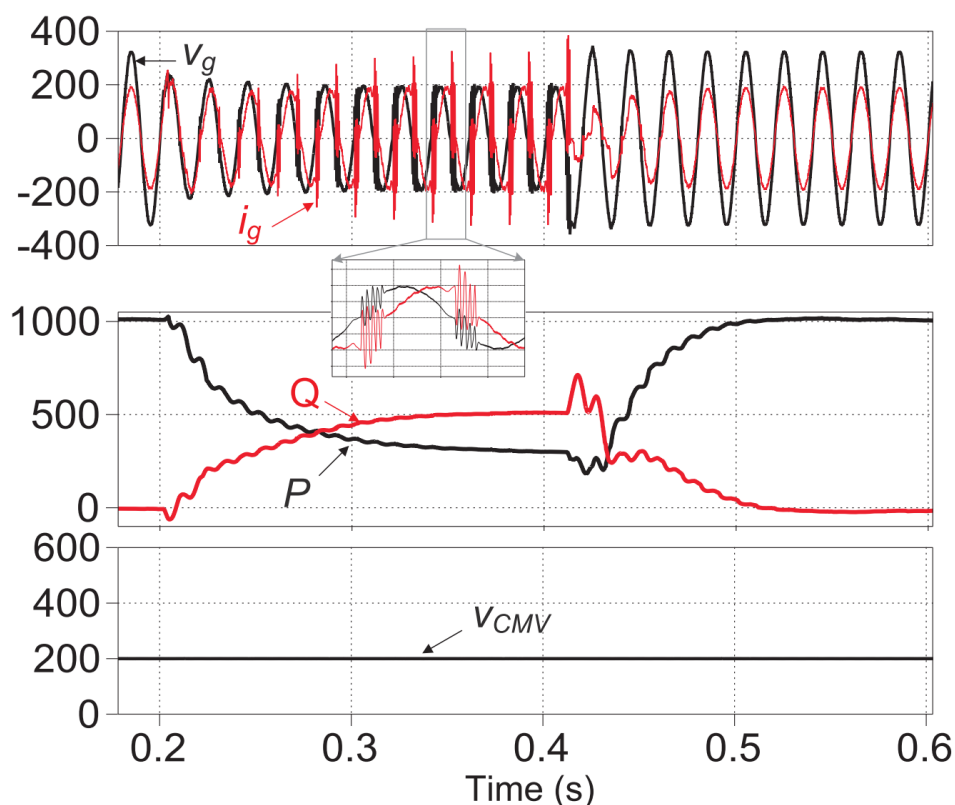
در صورتی که ولتاژ شبکه در محدوده $(1 - \frac{1}{k}) \leq V_g < 0.9$ پریونیت باشد، مقادیر جریان اکتیو و راکتیو به صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} I_d = \sqrt{(I_{max}/I_N)^2 - k^2(1 - V_g)^2} I_N \\ I_q = k(1 - V_g) I_N \end{cases} \quad (27-2)$$

از طرفی اگر ولتاژ شبکه کم‌تر از $(1 - \frac{1}{k})$ پریونیت باشد، جریان‌های اکتیو و راکتیو به صورت رابطه (۲۸-۲) محاسبه می‌شوند.

$$\begin{cases} I_d = \sqrt{(I_{max}/I_N)^2 - 1} I_N \\ I_q = I_N \end{cases} \quad (2-28)$$

شکل (۲-۳۳) خروجی سامانه فتوولتائیک را بر اساس شبیه‌سازی انجام‌شده در مرجع [۳۴] در صورت بروز فلش ولتاژ نشان می‌دهد. در این سامانه از ساختار اینورتری هریک استفاده شده است. همان‌طور که در مرجع [۳۴] نیز اشاره شده است، ولتاژ و جریان خروجی سامانه به‌هیچ‌عنوان قابل قبول نمی‌باشند. بنابراین این مرجع در پیاده‌سازی سامانه فتوولتائیکی که از ساختار هریک بهره‌مند باشد و بتواند به کنترل توان راکتیو در شرایط رخ دادن فلش ولتاژ بپردازد ناموفق بوده است.



شکل (۲-۳۳) خروجی سامانه فتوولتائیک با ساختار اینورتری هریک در صورت بروز فلش ولتاژ [۳۴]

در بخش ۲-۶-۱ مراجعی معرفی شد که روش‌هایی برای تعیین توان راکتیو مرجع با استفاده از پخش بار آنی در شبکه ارائه کرده‌اند. اما ممکن است این امکان برای همه شبکه‌ها (خصوصاً شبکه

توزیع) فراهم نباشد. استراتژی‌های ارائه‌شده در [۳۴] نیز صرفاً برای حالتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که فلش ولتاژ، کم‌تر از حد مجاز ولتاژ شبکه باشد. بنابراین در صورت وجود افت ولتاژ مجاز در شبکه، جبران‌سازی صورت نمی‌گیرد. به‌علاوه بر اساس مطالبی که در ابتدای بخش ۲-۶ بیان شد، در صورت وجود اضافه ولتاژ در شبکه نیز سامانه فتوولتائیک می‌تواند با کنترل توان راکتیو تأثیرگذار باشد. در هیچ‌کدام از استراتژی‌های مطرح‌شده، این وضعیت در نظر گرفته نشده است.

۲-۷ جمع‌بندی

در این فصل، مجموعه قوانین و مبانی مطرح در مورد سامانه‌های فتوولتائیک ارائه شد. در ابتدا استاندارد ۱۱۸۵۹ ملی ایران که چارچوب اتصال سامانه فتوولتائیک به شبکه را مشخص می‌کند، مطرح شد. سپس مطالبی در مورد انرژی خورشیدی و نحوه تبدیل آن به انرژی الکتریکی از طریق پنل خورشیدی بیان گردید. در ادامه نیز پیشرفت‌ها و تحولاتی که در سال‌های اخیر در حوزه سامانه‌های فتوولتائیک صورت گرفته است به همراه مبانی و نحوه محاسبه بعضی از پارامترهای آن مرور شد و در نهایت کنترل توان راکتیو توسط این سامانه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در فصول بعدی با توجه به بحث‌های پایه مطرح‌شده در این فصل، سامانه فتوولتائیک طراحی و شبیه‌سازی می‌شود.



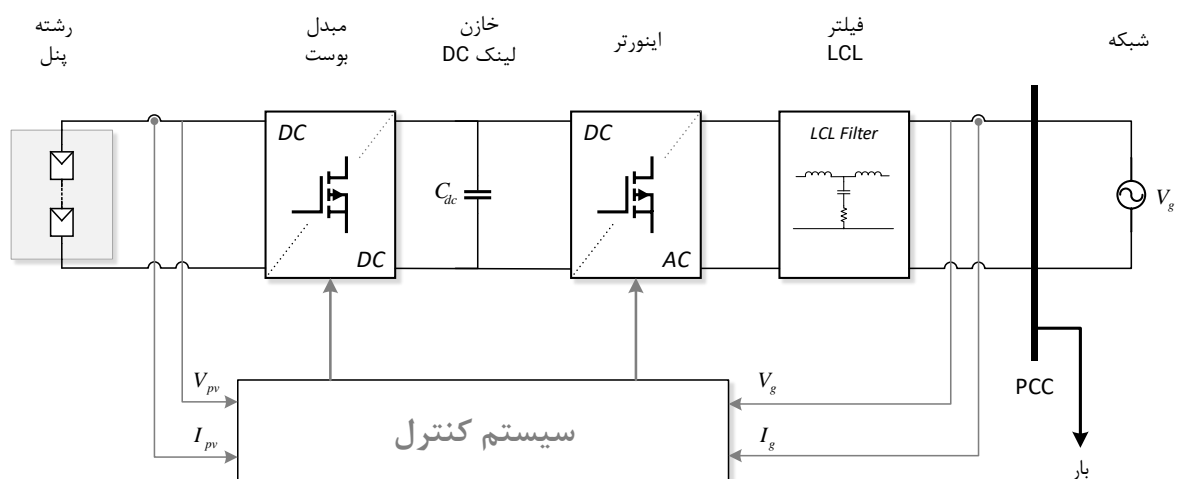
فصل ۳

طراحی سامانه فتورولتائیک



۱-۳ مقدمه

شکل (۱-۳) شمای یک سامانه فتوولتائیک را نشان می‌دهد. سامانه PV دارای بخش‌های مختلفی است که عبارت‌اند از: پنل‌های خورشیدی، مبدل بوست، خازن لینک DC، اینورتر، فیلتر LCL و سیستم کنترل. در این فصل ابتدا معیاری برای تخمین توان نامی سامانه فتوولتائیک بر اساس مساحت قابل بهره‌برداری ارائه می‌شود. سپس بر اساس توان محاسبه‌شده و مشخصات شبکه، پارامترهای سامانه فتوولتائیک محاسبه می‌شوند. در ادامه فصل به مهم‌ترین بخش طراحی سامانه فتوولتائیک یعنی طراحی کنترل‌کننده اینورتر پرداخته می‌شود. سیستم کنترل اینورتر به گونه‌ای کلیدها را کنترل می‌کند تا علاوه بر تبدیل توان DC به AC، جریان تزریق‌شده به شبکه دارای THD مطابق با استاندارد شبکه باشد. به‌علاوه، امکان تزریق یا مصرف توان راکتیو و توانایی کنترل آن که موضوع این پایان‌نامه به شمار می‌رود نیز به کمک این سیستم صورت می‌گیرد. در نهایت با توجه به این سیستم کنترل، روشی برای تخمین توان راکتیو مرجع در صورت وقوع خطا در شبکه پیشنهاد می‌شود.



شکل (۱-۳) شمای کلی سامانه فتوولتائیک

۲-۳ توان نامی سامانه فتوولتائیک

به طور کلی می توان میزان متوسط انرژی رسیده به سطح زمین از طریق خورشید را حدوداً 1 kW/m^2 در نظر گرفت [۷]. این مقدار در برخی نواحی با توجه به عرض جغرافیایی، کمی بیشتر و یا کمی کمتر خواهد بود. با توجه به جدول (۲-۳)، غالب پنل های خورشیدی که در سامانه فتوولتائیک استفاده می شوند بازده پایینی دارند. پنل های خورشیدی ارزان قیمت بازدهی حدوداً ۱۰ درصدی دارند در حالی که انواع گران قیمت آن ها با بازده ۲۰ درصد نیز در بازار موجودند، اما در اکثر موارد برای برقرار کردن مصالحه ای بین هزینه و بازده، از پنل هایی با بازده حدود ۱۵ درصد استفاده می شود. رابطه زیر مقدار توان خروجی پنل ها را بر اساس سطح استفاده شده نشان می دهد.

$$P_n = A \times 1 \text{ kW/m}^2 \times \mu \quad (۱-۳)$$

که در این رابطه P_n توان حدودی استخراج شده، A سطح مورد استفاده بر حسب مترمربع و μ بازده پنل خورشیدی می باشد.

هدف نهایی این پایان نامه، طراحی سامانه فتوولتائیک برای مصارف مسکونی است. در صورتی که یک چهارم پشت بام یک منزل مسکونی با زیربنای ۶۰ مترمربع را بتوان برای نصب سامانه خورشیدی در نظر گرفت، طبق رابطه (۱-۳) می توان حدود ۲ کیلووات توان برداشت کرد. اگر از پنل TSM-250PD05 ساخت شرکت Trina که مشخصات آن در جدول (۱-۳) ارائه شده است استفاده شود، برای حصول این توان به ۸ پنل نیاز خواهد بود که به صورت سری به هم متصل شوند. به این مجموعه پنل های سری شده یک «رشته پنل» گویند.

جدول (۲-۳) پارامترهای شبکه و سامانه PV را بر اساس شبکه توزیع ایران و پنل های خورشیدی مدنظر نشان می دهد. در ادامه فصل سایر پارامترهای سامانه فتوولتائیک بر اساس اطلاعات ارائه شده در این جدول طراحی خواهد شد.

جدول (۱-۳) مشخصات پنل TSM-250PD05 ساخت شرکت Trina

پارامتر	مقدار
حداکثر توان (P)	250 W
جریان اتصال کوتاه (I_{sc})	$8/55\text{ A}$
ولتاژ مدار باز (V_{oc})	$37/6\text{ V}$
جریان در نقطه حداکثر توان (I_{MPP})	$8/06\text{ A}$
ولتاژ در نقطه حداکثر توان (V_{MPP})	31 V
تعداد سلول‌های سری شده (Ncell)	۶۰

جدول (۲-۳) پارامترهای سامانه فتوولتائیک و شبکه‌ای که به آن متصل می‌شود

سامانه فتوولتائیک	
توان نامی (P_n)	2 kW
ولتاژ خروجی رشته پنل در بیشترین توان استخراج شده (V_{mp})	240 V
جریان خروجی رشته پنل در بیشترین توان استخراج شده (I_{mp})	$8/27\text{ A}$
شبکه	
ولتاژ نامی شبکه (V_g)	220 V (RMS)
فرکانس شبکه (f_g)	50 Hz
جریان نامی تزریق شده به شبکه (I_g)	$9/1\text{ A (RMS)}$

نکته: کلیه مقادیر جدول با فرض دریافت 1 kW/m^2 انرژی خورشیدی توسط پنل‌ها بیان شده‌اند.

۳-۳ خازن لینک DC

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، خازن لینک DC برای رفع مشکل عدم تطابق توان لحظه‌ای خروجی سامانه PV که مقداری متغیر با زمان است و توان لحظه‌ای ورودی که مقداری DC است به کار می‌رود [۱۴]. با توجه به رابطه (۲-۱۲) که در بخش ۲-۵-۳ محاسبه شد، برای به دست آوردن ظرفیت خازن لینک DC نیاز به مقدار ولتاژ دو سر آن (ولتاژ لینک DC) است. با توجه به ولتاژ نامی شبکه، حداقل مقدار ولتاژی که اینورتر برای تبدیل توان DC به AC نیاز دارد، ۳۱۱ ولت است. هرچند می‌توان همین مقدار ولتاژ را برای لینک DC انتخاب کرد، ولی با توجه به روابطی که برای طراحی خازن لینک DC و

فیلتر خروجی اینورتر ارائه شد، ولتاژ بالاتر باعث کاهش ظرفیت خازن‌ها و سلف‌های به‌کاررفته در سامانه PV می‌شود. از طرف دیگر، با بالاتر رفتن ولتاژ لینک DC، اجزای به‌کاررفته در سامانه PV مانند کلیدها باید ولتاژ بیشتری را تحمل کنند که این امر موجب افزایش هزینه قطعات استفاده‌شده در سامانه فتوولتائیک می‌شود. با توجه به این موارد، اکثر مقالات ولتاژ لینک DC را برابر ۴۰۰ ولت در نظر می‌گیرند. در این پایان‌نامه نیز همین مقدار برای ولتاژ لینک DC انتخاب می‌شود.

در رابطه (۲-۱۲) ضریب توان، واحد فرض شد؛ بنابراین در این رابطه می‌توان مقدار S_n را برابر با توان نامی سامانه فتوولتائیک در نظر گرفت. با قرار دادن توان نامی سامانه و ریپل ولتاژی به اندازه ۵ درصد ولتاژ لینک DC، ظرفیت خازن برابر با $800 \mu F$ محاسبه می‌شود.

۴-۳ مبدل بوست و روش کنترل آن

پنل‌های خورشیدی مورد استفاده در سامانه PV که در بخش ۳-۲ طراحی شدند، توانایی تأمین حداقل ولتاژ لینک DC (۳۱۱ ولت) را ندارند. از این‌رو، ولتاژ خروجی این پنل‌ها می‌بایست به سطح بالاتری افزایش یابد. این امر توسط یک مبدل بوست که در بخش ۲-۵-۲ مورد بررسی قرار گرفت، انجام می‌شود. با توجه به روابط (۲-۴) و (۲-۵) و مقادیر مورد نظر در طراحی سامانه PV، مقدار سلف L در مبدل بوست برابر $300 \mu H$ و مقدار خازن $5 \mu F$ محاسبه می‌شود. از آنجاکه در خروجی مبدل بوست، خازن لینک DC با ظرفیتی بیشتر استفاده می‌شود، نیازی به پیاده‌سازی این خازن وجود ندارد.

همان‌طور که قبلاً گفته شد، پنل‌های خورشیدی مورد استفاده در سامانه‌های PV بازده پایینی دارند. این امر موجب می‌شود که تمامی توان تولیدشده توسط این پنل‌ها ارزشمند باشد. برای استخراج حداکثر توان ممکن از پنل‌های خورشیدی و همچنین تأمین ولتاژ لینک DC، روش‌های ارائه شده‌اند که می‌توانند به کمک مبدل بوست پیاده‌سازی شوند. با توجه به مزایای روش P&O که در بخش ۲-۵-۶ مورد بررسی

قرار گرفت، از این روش برای ردیابی نقطه حداکثر توان به کمک مبدل بوست استفاده می‌شود. الگوریتم این روش در شکل (۲-۲۰) قابل مشاهده است.

۳-۵ اینورتر و نحوه کلیدزنی آن

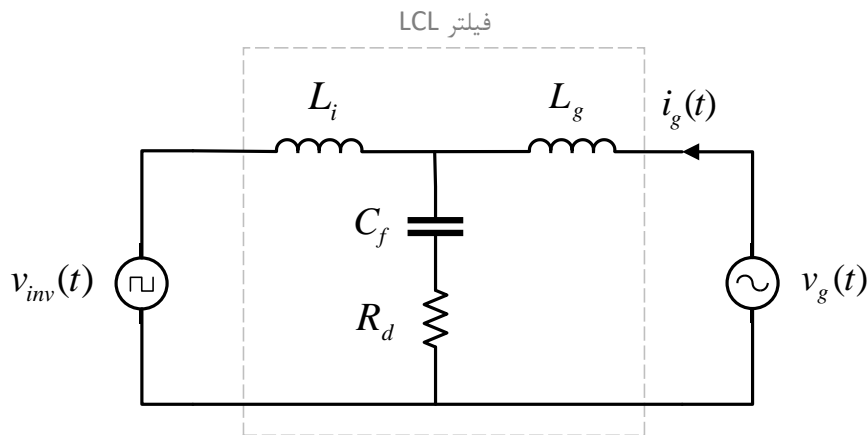
در فصل قبل به صورت مفصل در مورد ساختار اینورتر در سامانه فتوولتائیک و نحوه کلیدزنی آن بحث شد. به دلیل مزایای اینورتر هریک به همراه روش کلیدزنی تک قطبی ارائه شده در مرجع [۱]، از این ساختار و روش کلیدزنی در این پایان نامه استفاده می‌شود. بر اساس روابطی که برای پارامترهای فیلتر LCL و مبدل بوست در فصل قبل بیان شد، افزایش فرکانس کلیدزنی می‌تواند باعث کاهش ظرفیت خازن‌ها و مقادیر سلف‌ها شود. اما از سوی دیگر این امر هزینه مربوط به سیستم کنترل و کلیدهای مورد استفاده در سامانه را افزایش می‌دهد. با توجه به این موارد، فرکانس کلیدزنی برابر با $f_{sw} = 20 \text{ kHz}$ انتخاب می‌شود.

۳-۶ طراحی فیلتر LCL

با توجه به مزایایی که در بخش ۲-۵-۸ برای فیلتر LCL ذکر شد، در طراحی سامانه فتوولتائیک برای حذف هارمونیک‌های جریان خروجی اینورتر از این فیلتر استفاده می‌شود. شکل (۳-۲)، نحوه اتصال فیلتر LCL به خروجی اینورتر و شبکه را نمایش می‌دهد. در این شکل، ولتاژ لحظه‌ای خروجی اینورتر، $v_g(t)$ و ولتاژ لحظه‌ای شبکه، $i_g(t)$ جریان تزریق شده به شبکه، L_i سلف سمت اینورتر، L_g سلف سمت شبکه و C_f خازن موازی می‌باشد. از آنجاکه قطب‌های رزونانسی فیلتر LCL می‌تواند بر روی پایداری سیستم تأثیر بگذارد از یک مقاومت میرا کننده به صورت سری با خازن C_f برای رفع این مشکل استفاده می‌شود [۳۱]. این مقاومت در شکل (۳-۲) با نام R_d مشخص شده است.

جریان تزریق شده به شبکه که در شکل (۳-۲) با $i_g(t)$ نمایش داده شده است، به ولتاژ خروجی اینورتر $v_{inv}(t)$ و ولتاژ شبکه $v_g(t)$ وابسته است. بنابراین تمامی هارمونیک‌های موجود در این دو ولتاژ

در جریان تزریق شده نیز حضور دارند. معادله (۲-۳) رابطه بین جریان تزریقی به شبکه و ولتاژ خروجی اینورتر و معادله (۳-۳) رابطه این جریان با ولتاژ شبکه را نمایش می دهد.



شکل (۲-۳) فیلتر LCL

$$\frac{I_g(s)}{V_{inv}(s)} = -\frac{C_f R_d s + 1}{L_i L_g C_f s^3 + R_d C_f (L_i + L_g) s^2 + (L_i + L_g) s}, \quad v_g(t) = 0 \quad (2-3)$$

$$\frac{I_g(s)}{V_g(s)} = \frac{L_i C_f s^2 + C_f R_d s + 1}{L_i L_g C_f s^3 + R_d C_f (L_i + L_g) s^2 + (L_i + L_g) s}, \quad v_{inv}(t) = 0 \quad (3-3)$$

بر اساس استاندارد ۱۱۸۵۹ ملی ایران، جریان تزریق شده می تواند شامل هارمونیک های ولتاژ شبکه باشد. بنابراین هارمونیک های جریان تزریق شده که می بایست تضعیف شوند تنها به هارمونیک های ولتاژ خروجی اینورتر بستگی دارد. با توجه به این موضوع، می توان از رابطه (۳-۳) چشم پوشی کرده و تابع تبدیل فیلتر LCL را همانند رابطه زیر محاسبه کرد:

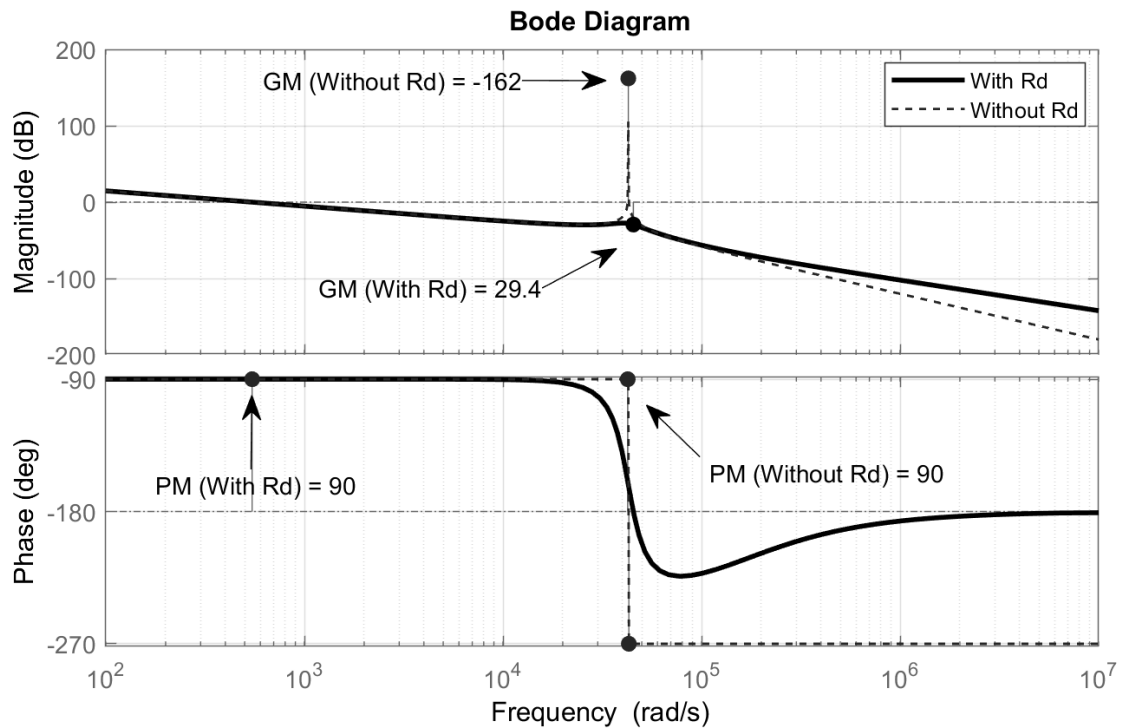
$$G_{LCL}(s) = -\frac{C_f R_d s + 1}{L_i L_g C_f s^3 + R_d C_f (L_i + L_g) s^2 + (L_i + L_g) s} \quad (4-3)$$

جدول (۳-۳) پارامترهای فیلتر LCL که با استفاده از روابط (۲-۱۳) تا (۲-۲۱) محاسبه شده اند را نشان می دهد. با توجه به رابطه (۲-۱۹) و مقادیر جدول (۳-۳)، فرکانس رزونانس ۶۸۰۰ Hz محاسبه شده است که در رابطه (۲-۲۰) صدق می کند.

جدول (۳-۳) پارامترهای طراحی شده فیلتر LCL

پارامتر	مقدار
سلف سمت اینورتر تر (L_i)	$1/7 \text{ mH}$
سلف سمت شبکه (L_g)	$87 \text{ } \mu\text{H}$
خازن موازی (C_f)	$6/6 \text{ } \mu\text{F}$
مقاومت میرا کننده (R_d)	$1/185 \text{ } \Omega$
فرکانس رزونانس (f_{res})	6800 Hz

با جایگذاری پارامترهای طراحی شده برای فیلتر LCL مطابق با جدول (۳-۳) در رابطه (۳-۴)، می‌توان تابع تبدیل فیلتر LCL را محاسبه کرد. شکل (۳-۳) پاسخ فرکانسی فیلتر را در حضور و عدم حضور مقاومت میرا کننده نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از مقاومت میرا کننده باعث افزایش حاشیه بهره^۱ و در نتیجه پایداری سیستم شده است.

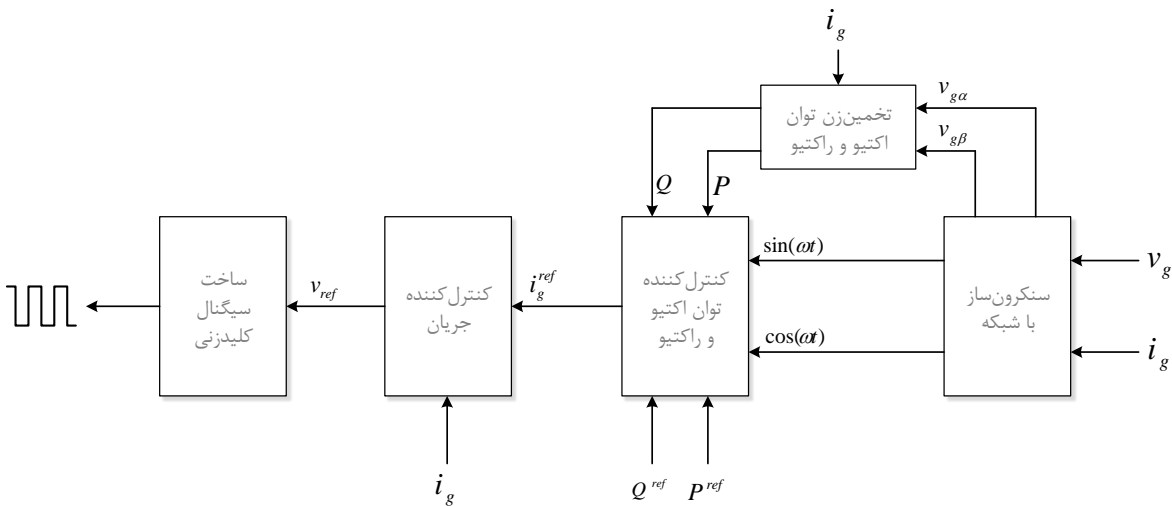


شکل (۳-۳) پاسخ فرکانسی تابع تبدیل فیلتر LCL در حضور و عدم حضور مقاومت میرا کننده R_d

^۱ Gain Margin

۷-۳ کنترل کننده اینورتر

اینورتر در سامانه فتوولتائیک وظیفه تبدیل توان DC به توان AC و تزریق آن به شبکه را بر عهده دارد. به طور کلی سیستم کنترل اینورتر از سه بخش تشکیل شده است: کنترل کننده جریان، کنترل کننده توان و سنکرون ساز با شبکه. شمای کلی سیستم کنترل اینورتر در شکل (۳-۴) نمایش داده شده است. کنترل کننده توان با مقایسه توان های اکتیو و راکتیو خروجی با مقادیر مرجع آن ها، دامنه جریان مرجع را می سازد. این جریان مرجع توسط سنکرون ساز با ولتاژ شبکه هماهنگ می شود. کنترل کننده جریان نیز با مقایسه جریان مرجع با جریان خروجی سامانه، ولتاژ مرجعی را تولید می کند که بر اساس آن سیگنال های کنترلی کلیدهای اینورتر تولید می شوند. در ادامه به طراحی سیستم کنترل اینورتر شامل کنترل کننده جریان، کنترل کننده توان و سنکرون ساز با شبکه پرداخته خواهد شد.



شکل (۳-۴) شمای کلی سیستم کنترل اینورتر سامانه PV

۱-۷-۳ کنترل کننده جریان

کنترل کننده جریان با مقایسه جریان مرجع و جریان خروجی سامانه فتوولتائیک، ولتاژ مرجع خروجی را برای تولید سیگنال های آتش کلیدهای اینورتر تولید می کند. در این بخش ابتدا این کنترل کننده مدل شده، سپس با محاسبه پارامترهای آن، پایداری کنترل کننده سنجیده می شود.

۳-۷-۱-۱ مدل سازی سیستم

در بخش ۳-۶ ثابت شد که جریان تزریق شده به شبکه به ولتاژ خروجی اینورتر و ولتاژ شبکه وابسته است. بنابراین با جمع آثار روابط (۳-۲) و (۳-۳) که در بخش ۳-۶ محاسبه شد، می توان رابطه زیر را به دست آورد:

$$I_g(s) = G_{LCL}(s) \left(\frac{L_i C_f s^2 + C_f R_d s + 1}{C_f R_d s + 1} V_g + V_{inv} \right) \quad (۴-۳)$$

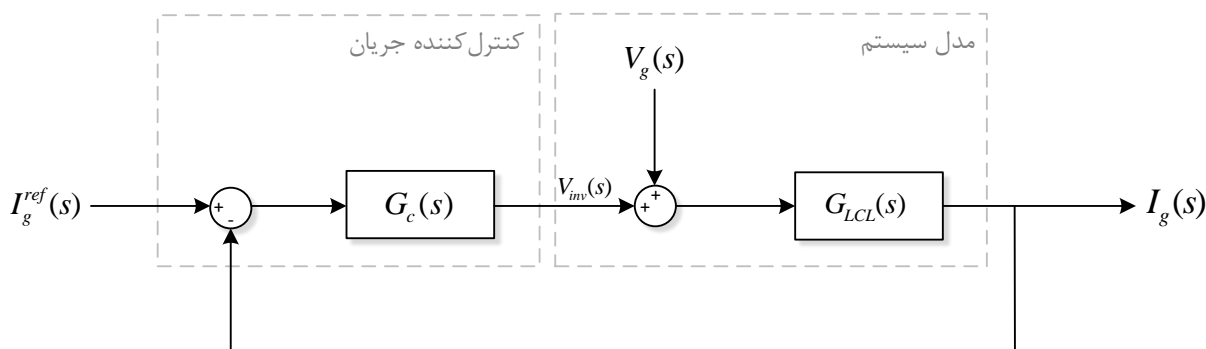
که

$$G_{LCL}(s) = - \frac{C_f R_d s + 1}{L_i L_g C_f s^3 + R_d C_f (L_i + L_g) s^2 + (L_i + L_g) s} \quad (۵-۳)$$

در این روابط I_g جریان تزریق شده به شبکه، V_g ولتاژ شبکه، V_{inv} ولتاژ خروجی اینورتر و L_i ، L_g ، C_f و R_d پارامترهای فیلتر LCL می باشد. با محاسبه پاسخ فرکانسی $\frac{L_i C_f s^2 + C_f R_d s + 1}{C_f R_d s + 1}$ در فرکانس شبکه، مقدار دامنه آن برابر ۱ و مقدار فاز آن صفر درجه است بنابراین رابطه (۴-۳) را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

$$I_g(s) = G_{LCL}(s) (V_g + V_{inv}) \quad (۶-۳)$$

کنترل کننده جریان با مقایسه جریان مرجع و جریان خروجی سامانه PV و ساخت ولتاژ مرجع، الگوی ولتاژ خروجی اینورتر را مشخص می کند. بر اساس معادله (۶-۳)، این ولتاژ یکی از عوامل مؤثر در جریان خروجی سامانه است. بر همین اساس می توان بلوک دیاگرام کنترل کننده جریان را رسم کرد. شکل (۵-۳) بلوک دیاگرام کنترل کننده جریان را با توجه به مدل سیستم که در معادله (۶-۳) به دست آمد را نمایش می دهد.



شکل (۳-۵) بلوک دیاگرام کنترل کننده جریان

۲-۱-۷-۳ جبران ساز حلقه جریان

همان طور که قبلاً گفته شد، در سامانه‌های PV سه فاز با استفاده از تبدیل پارک (تبدیل ABC به dq0) می‌توان مقادیر سه فاز شبکه را به مؤلفه‌های DC تبدیل کرد. در سامانه‌های تک‌فاز نیز می‌توان از این تبدیل استفاده کرد اما این کار باعث پیچیدگی سیستم کنترل می‌شود. راه‌حل این مشکل، استفاده مستقیم از سیگنال‌های سینوسی بدون تبدیل آن‌ها به مقادیر DC است. جبران‌ساز رایج PI در هنگام دنبال کردن سیگنال‌های سینوسی دارای خطا در دامنه و فاز است؛ بنابراین برای دنبال کردن جریان مرجع سینوسی توسط کنترل کننده جریان می‌بایست از یک جبران‌ساز با مرتبه بالاتر استفاده کرد [۱۸].

بر اساس شکل (۳-۵)، رابطه بین ورودی و خروجی در حلقه کنترل جریان به صورت زیر است:

$$I_g(s) = H_i(s)I_g^{ref}(s) + H_v(s)V_g(s) \quad (۷-۳)$$

$$H_i(s) = \frac{G_c(s)G_{LCL}(s)}{1 + G_c(s)G_{LCL}(s)} \quad (۸-۳)$$

$$H_v(s) = \frac{G_{LCL}(s)}{1 + G_c(s)G_{LCL}(s)} \quad (۹-۳)$$

برای این‌که جبران‌ساز $G_c(s)$ بتواند $i_g^{ref}(t)$ را دنبال کند، دامنه $H_i(j\omega)$ در فرکانس شبکه

می‌بایست ۱ باشد. در صورتی‌که بهره جبران‌ساز $G_c(s)$ در فرکانس شبکه بزرگ باشد، دامنه $H_i(j\omega)$

در این فرکانس واحد خواهد شد. از طرفی بهره بزرگ $G_c(s)$ در فرکانس شبکه باعث صفر شدن بهره $H_v(j\omega)$ در فرکانس شبکه می‌شود. صفر شدن بهره $H_v(j\omega)$ در فرکانس شبکه، نیازمندی به پس‌خور ولتاژ شبکه را از بین می‌برد.

جبران‌سازهای PR^۱، RSC^۲، RC^۳ و DB^۴ شرط فوق را محقق می‌سازند بنابراین می‌توان از آن‌ها برای دنبال کردن سیگنال سینوسی استفاده کرد. جبران‌ساز PR عملکرد خوبی در دنبال کردن سیگنال‌های سینوسی دارد [۳۴] بنابراین در این پایان‌نامه از این جبران‌ساز در کنترل‌کننده جریان استفاده می‌شود.

تابع تبدیل جبران‌ساز PR به صورت زیر است:

$$G_c(s) = K_p + K_r \frac{s}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (۱۰-۳)$$

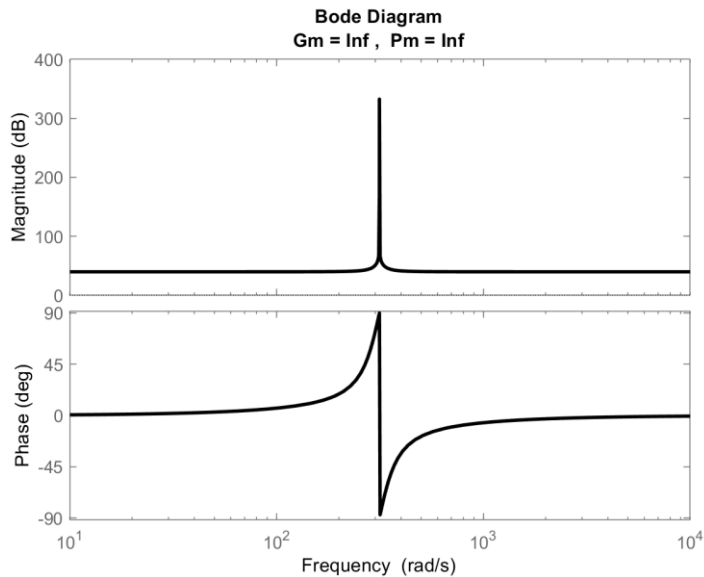
که K_p ضریب تناسبی، K_r ضریب رزونانس، ξ ضریب میرا کننده و ω_0 فرکانس شبکه می‌باشد. شکل (۳-۶) پاسخ فرکانسی یک جبران‌ساز PR ایده‌آل را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بهره جبران‌ساز در فرکانس شبکه (ω_0) مقداری بزرگ است. ضریب ξ در تابع تبدیل جبران‌ساز برای کاهش یا افزایش پهنای باند آن به کار می‌رود. در صورتی که ξ برابر صفر اختیار شود، جبران‌ساز ایده‌آل خواهد بود که در فرکانس ω_0 بهره بسیار بالایی دارد اما بهره جبران‌ساز برای سایر فرکانس‌ها پایین است. برای طراحی جبران‌ساز PR، ابتدا تأثیر این ضرایب بر روی پاسخ فرکانسی تابع حلقه بسته کنترل‌کننده جریان مورد بررسی قرار خواهد گرفت و سپس مقادیر مطلوب پیشنهاد می‌شوند.

¹ Proportional Resonant Controller

² Resonant Controller

³ Repetitive Controller

⁴ Deadbeat Controller



شکل (۳-۶) پاسخ فرکانسی جبران ساز PR ایده آل

بر اساس شکل (۳-۵) می توان تابع تبدیل حلقه بسته کنترل کننده جریان را به صورت زیر نوشت:

$$GH(s) = G_c(s) \times G_{LCL}(s) \times 1 \quad (11-3)$$

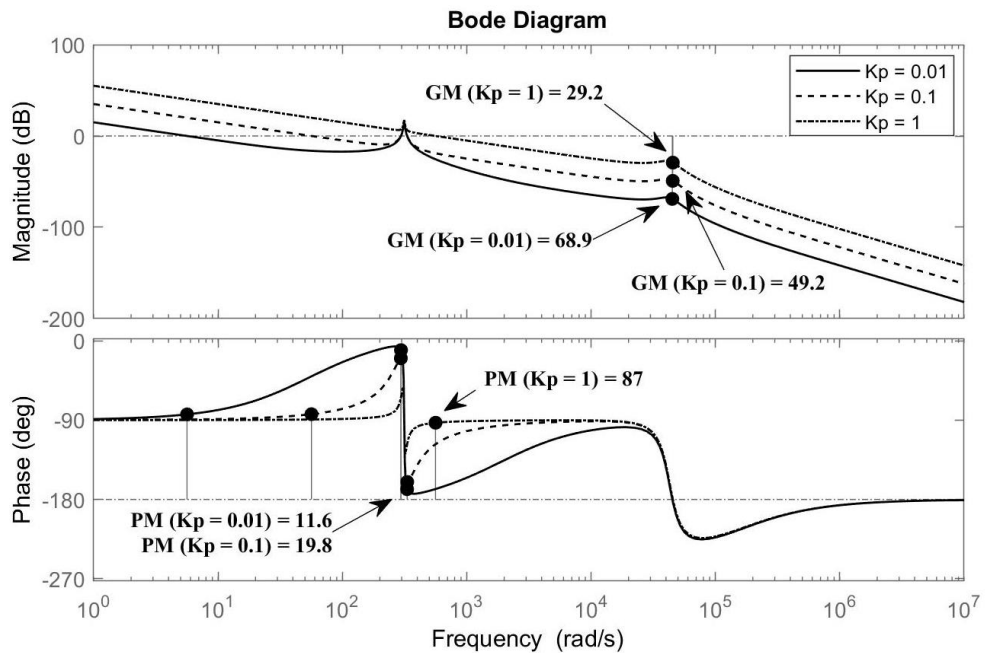
$$= \left(K_p + K_r \frac{s}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \right) \frac{C_f R_d s + 1}{L_i L_g C_f s^3 + R_d C_f (L_i + L_g) s^2 + (L_i + L_g) s}$$

شکل (۳-۷) پاسخ فرکانسی تابع حلقه بسته کنترل کننده را به ازای مقادیر مختلف K_p نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود با افزایش مقدار K_p حاشیه بهره کاهش می یابد به طوری که در مقدار ۱۰ حاشیه بهره منفی شده و سیستم ناپایدار می شود. از طرفی افزایش K_p باعث افزایش حاشیه فاز^۱ می شود به طوری که در $K_p = 1$ شاهد بیشترین مقدار حاشیه فاز خواهیم بود.

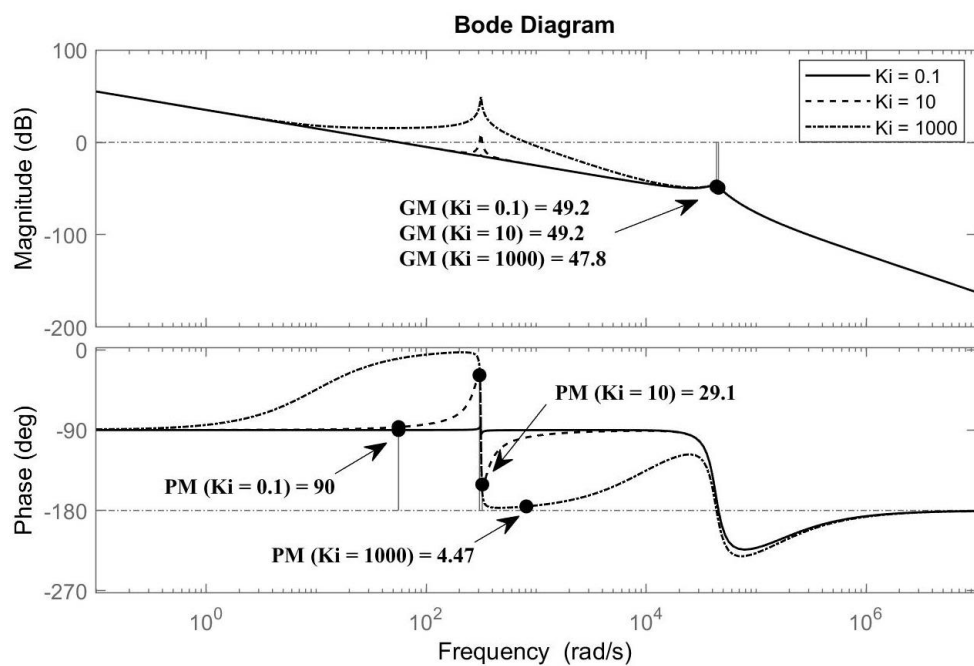
تأثیر K_r های متفاوت بر روی پاسخ فرکانسی تابع تبدیل حلقه بسته در شکل (۳-۸) نشان داده شده است. مقادیر کم تر K_r باعث افزایش حاشیه بهره و حاشیه فاز و در نتیجه بهبود پایداری کنترل کننده می شود؛ ولی زمان رسیدن به خطای حالت دائمی صفر را افزایش می دهد. در نتیجه این مقدار می بایست

^۱ Phase Margin

به گونه‌ای انتخاب شود که مصالحه‌ای بین پایداری و زمان رسیدن به خطای حالت دائمی صفر برقرار گردد.



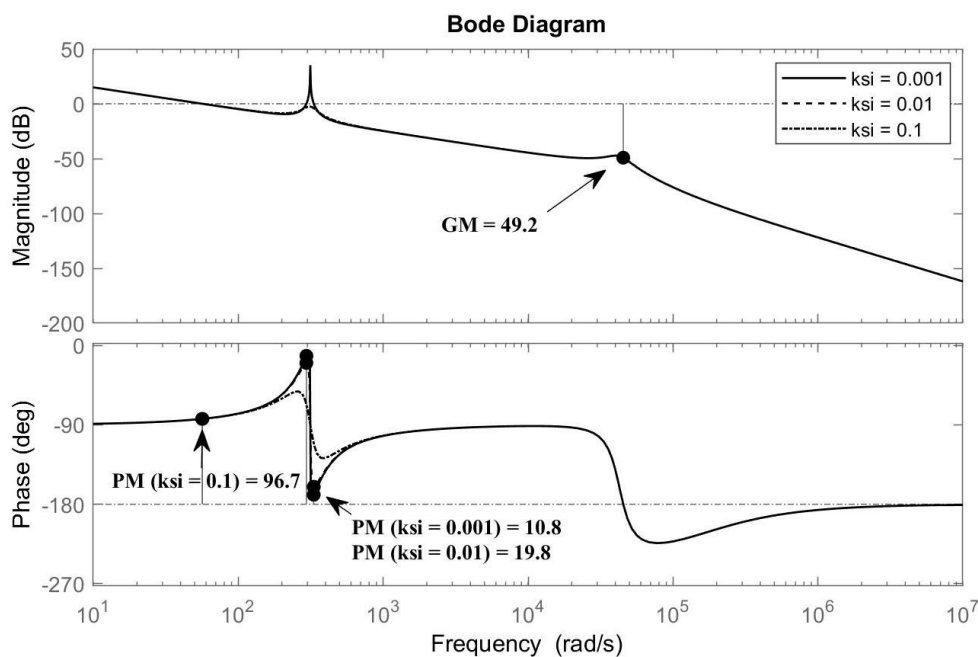
شکل (۷-۳) پاسخ فرکانسی تابع حلقه بسته کنترل کننده به ازای K_p های مختلف



شکل (۸-۳) پاسخ فرکانسی تابع حلقه بسته کنترل کننده به ازای K_i های مختلف

شکل (۳-۹) پاسخ فرکانسی تابع حلقه بسته کنترل کننده را به ازای مقادیر مختلف ξ نشان می‌دهد. تأثیر این پارامتر بر روی دامنه و فاز تابع تبدیل حلقه بسته در فرکانس شبکه است به طوری که با افزایش ξ مقدار دامنه و فاز این تابع تبدیل کاهش می‌یابد در نتیجه سرعت جبران ساز در دنبال کردن سیگنال مرجع کم می‌شود. بنابراین مقدار ξ می‌بایست طوری انتخاب شود تا هم بهره جبران ساز PR بالا باشد و هم پهنای باند جبران ساز بیشتر از مقدار ایده‌آل آن باشد.

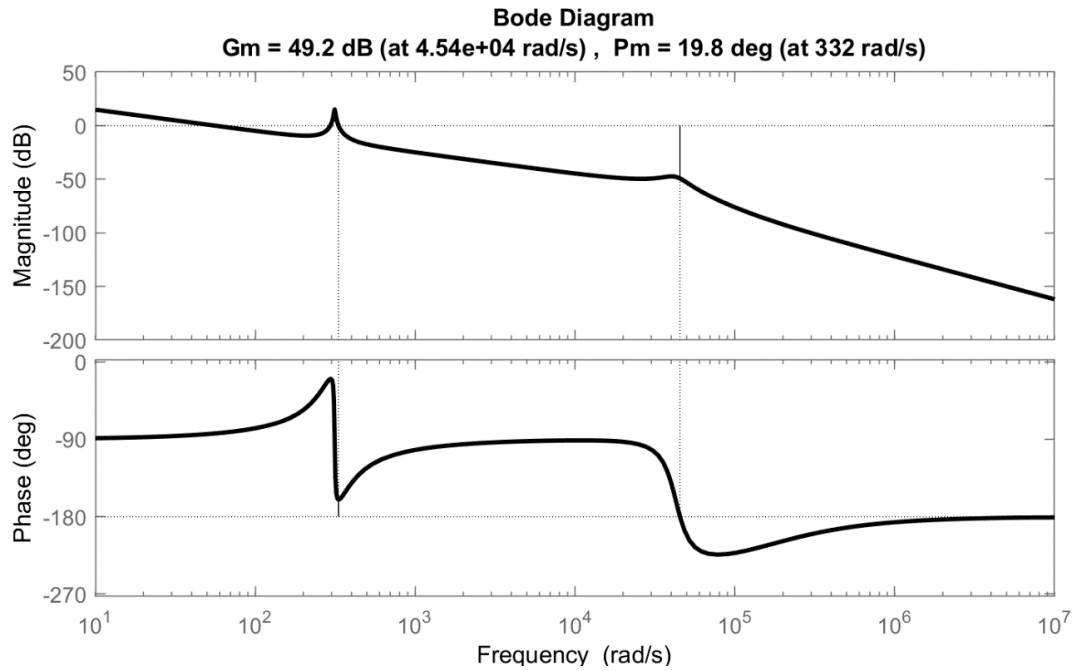
جدول (۳-۴) مقادیر پیشنهادی برای پارامترهای جبران ساز PR که بر اساس آزمون و خطا به دست آمده‌اند را نمایش می‌دهد. با استفاده از این مقادیر، پاسخ فرکانسی تابع حلقه بسته سیستم به صورت شکل (۳-۱۰) خواهد بود. همان طور که این شکل نشان می‌دهد، مقادیر به دست آمده برای حاشیه بهره و حاشیه فاز، بیانگر پایداری سیستم است. شکل (۳-۱۱) دنبال کردن سیگنال مرجع را در حضور و عدم حضور جبران ساز نشان می‌دهد. همان طور که از این شکل پیداست، بدون وجود جبران ساز، کنترل کننده جریان قادر به دنبال کردن جریان مرجع نخواهد بود.



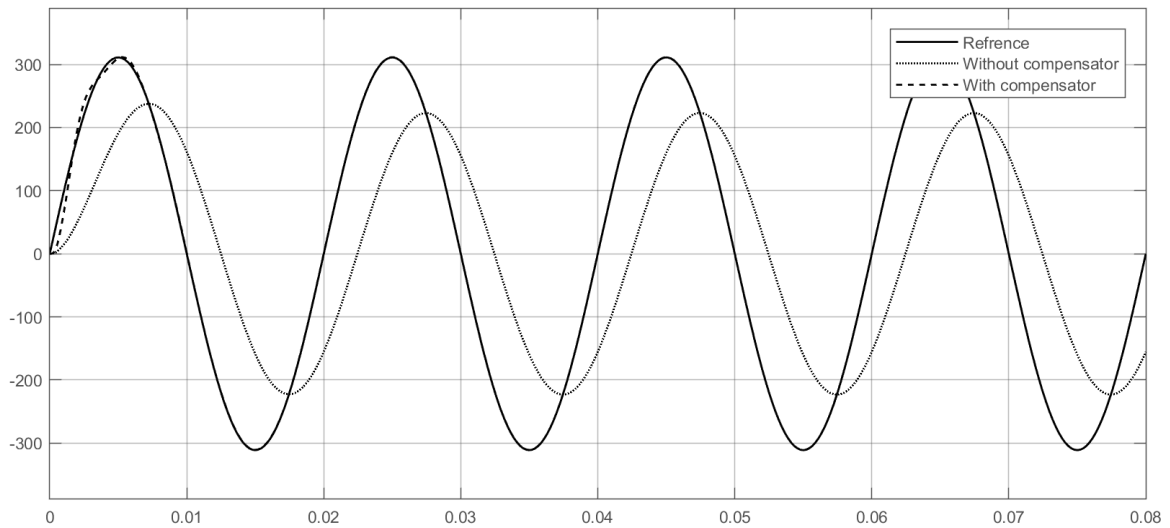
شکل (۳-۹) پاسخ فرکانسی تابع حلقه بسته کنترل کننده به ازای ξ های مختلف

جدول (۳-۴) پارامترهای طراحی شده جبران ساز PR

ضریب میراکننده (ξ)	ضریب رزونانس (K_r)	ضریب تناسبی (K_p)	فرکانس پایه (ω_0)	پارامتر
۰/۰۱	۲۰	۰/۱	۳۱۴	مقدار



شکل (۳-۱۰) پاسخ فرکانسی تابع حلقه بسته کنترل کننده جریان با توجه به مقادیر جدول (۴-۳)



شکل (۳-۱۱) دنبال کردن سیگنال مرجع در حضور و عدم حضور جبران ساز PR

۳-۷-۲ تضعیف هارمونیک‌های فرد در حلقه جریان

برای افزایش تضعیف هارمونیک‌های جریان خروجی، مرجع [۴۰] رابطه (۳-۱۲) را ارائه کرده است. این رابطه شکل توسعه‌یافته تابع تبدیل جبران‌ساز PR است که علاوه بر جبران خطای سیگنال‌های سینوسی، قادر به حذف هارمونیک‌های فرد نیز می‌باشد. در رابطه زیر که بخش اول آن تابع تبدیل جبران‌ساز PR رابطه (۳-۱۰) و بخش دوم آن تضعیف‌کننده هارمونیک‌های فرد است، K_{rh} ضریب رزونانس هارمونیک‌های با مرتبه h می‌باشد:

$$G_c(s) = K_p + K_r \frac{s}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} + \sum_{h=3,5,7,\dots} K_{rh} \frac{s}{s^2 + (h\omega_0)^2} \quad (۳-۱۲)$$

عمده هارمونیک‌هایی که در جریان خروجی جاری می‌شود، هارمونیک مرتبه ۳ است. برای تضعیف این هارمونیک مقدار K_{r3} برابر ۰/۰۱ در نظر گرفته می‌شود. صحت عملکرد این تضعیف‌کننده در فصل بعد مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۷-۳ کنترل‌کننده توان اکتیو و راکتیو

توان اکتیو و راکتیو خروجی سامانه PV می‌بایست با حداقل اختلاف ممکن نسبت به مقادیر مرجع به شبکه تزریق شوند. مقادیر مرجع این توان‌ها از طریق مرکز کنترل شبکه و یا روش‌های دیگری که در بخش ۲-۶ مطرح شد، تعیین می‌گردند. کنترل‌کننده توان اکتیو و راکتیو وظیفه جبران‌سازی این توان‌ها را بر عهده دارد و حاصل این جبران‌سازی، جریان مرجعی است که به‌عنوان ورودی کنترل‌کننده جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه به مدل‌سازی و تعیین پارامترهای کنترل‌کننده توان پرداخته می‌شود.

توان اکتیو خروجی اینورتر با جریانی هم‌فاز با ولتاژ شبکه متناسب بوده و توان راکتیو خروجی اینورتر با جریانی که عمود بر ولتاژ شبکه است (۹۰ درجه با ولتاژ شبکه اختلاف‌فاز دارد) متناسب است [۴۱]. بنابراین جریان مرجع $i_g^{ref}(t)$ را می‌توان به دو مؤلفه جریان مرجع اکتیو $i_{gp}^{ref}(t)$ و جریان مرجع

راکتیو $i_{gq}^{ref}(t)$ در رابطه (۱۳-۳) تفکیک کرد. اگر ولتاژ شبکه را برابر $v_g(t) = V_m \sin(\omega t)$ در نظر بگیریم، روابط (۱۴-۳) و (۱۵-۳) به ترتیب مقدار جریان مرجع اکتیو و راکتیو را نشان می‌دهد که در این روابط I_p^{ref} مقدار پیک جریان مرجع اکتیو و I_q^{ref} مقدار پیک جریان مرجع راکتیو می‌باشد. با جایگذاری روابط (۱۴-۳) و (۱۵-۳) در (۱۳-۳)، رابطه (۱۶-۳) حاصل می‌شود. با توجه به این که متوسط توان اکتیو و راکتیو به ترتیب برابر $P = \frac{1}{2} V_m I_p$ و $Q = \frac{1}{2} V_m I_q$ می‌باشد، می‌توان از رابطه (۱۶-۳) به رابطه (۱۷-۳) رسید. شکل (۱۲-۳) حلقه‌های کنترل توان اکتیو و راکتیو را با توجه به رابطه (۱۷-۳) نشان می‌دهد.

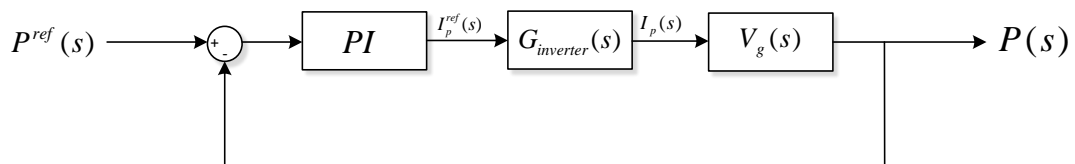
$$i_g^{ref}(t) = i_{gp}^{ref}(t) + i_{gq}^{ref}(t) \quad (۱۳-۳)$$

$$i_{gp}^{ref}(t) = I_p^{ref} \sin(\omega t) \quad (۱۴-۳)$$

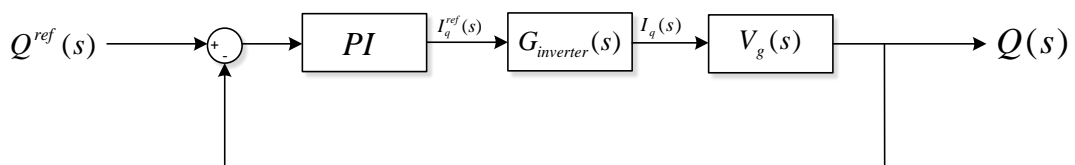
$$i_{gq}^{ref}(t) = I_q^{ref} \cos(\omega t) \quad (۱۵-۳)$$

$$i_g^{ref}(t) = I_p^{ref} \sin(\omega t) + I_q^{ref} \cos(\omega t) \quad (۱۶-۳)$$

$$i_g^{ref}(t) = 2 \left(\frac{P^{ref} \sin(\omega t)}{V_m} + \frac{Q^{ref} \cos(\omega t)}{V_m} \right) \quad (۱۷-۳)$$



الف



ب

شکل (۱۲-۳) بلوک دیاگرام کنترل‌کننده‌های توان اکتیو (الف) کنترل‌کننده توان اکتیو (ب) کنترل‌کننده توان راکتیو

توان اکتیو و راکتیو را می‌توان از طریق روابط (۱۳-۳) تا (۱۶-۳) به صورت روابط (۱۸-۳) و (۱۹-۳) محاسبه کرد [۴۲]. رابطه (۱۸-۳) توان اکتیو لحظه‌ای خروجی و رابطه (۱۹-۳) توان راکتیو لحظه‌ای خروجی را نشان می‌دهد.

$$P_{out} = \frac{v_{g\alpha} i_{g\beta} + v_{g\beta} i_{g\alpha}}{2} \quad (18-3)$$

$$Q_{out} = \frac{v_{g\beta} i_{g\alpha} - v_{g\alpha} i_{g\beta}}{2} \quad (19-3)$$

در این روابط $v_{g\alpha}$ مؤلفه موازی ولتاژ شبکه، $v_{g\beta}$ مؤلفه عمودی ولتاژ شبکه، $i_{g\alpha}$ مؤلفه موازی جریان تزریق شده به شبکه و $i_{g\beta}$ مؤلفه عمودی این جریان می‌باشد.

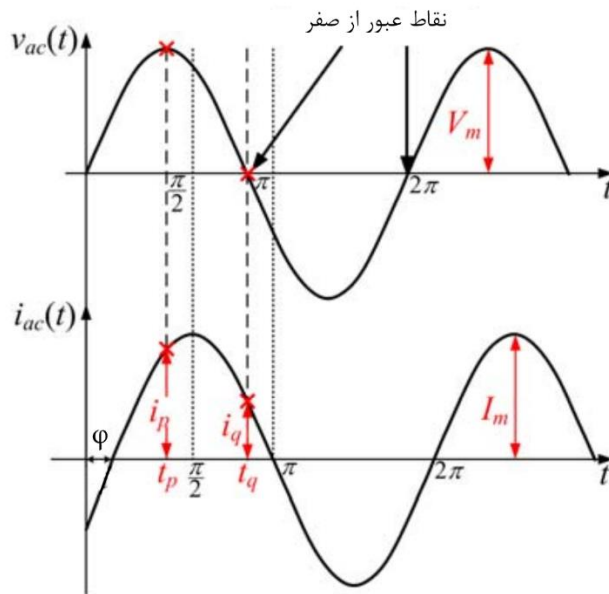
هرچند روابط (۱۸-۳) و (۱۹-۳) توان‌های لحظه‌ای اکتیو و راکتیو را به صورت دقیق محاسبه می‌کند اما به دلیل نیاز به محاسبه تمامی مؤلفه‌های موازی و عمودی ولتاژ و جریان میزان محاسبات بسیار بالا هست. مرجع [۴۳] روشی برای تخمین توان‌های لحظه‌ای اکتیو و راکتیو ارائه می‌کند که در هر سیکل ولتاژ، فقط یک بار مقدار توان‌ها محاسبه می‌شوند. مزیت این روش نسبت به روش قبل بار محاسباتی کم‌تر و عدم نیاز به مؤلفه عمودی جریان است. بر اساس مرجع [۴۳]، با فرض اختلاف‌فازی به اندازه φ بین ولتاژ شبکه و جریان تزریق شده به آن، جریان تزریق شده به شبکه به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$i_g(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (20-3)$$

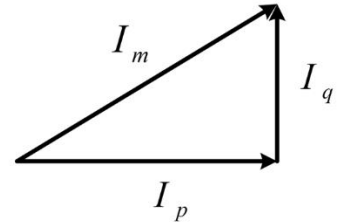
شکل (۱۳-۳)-الف، رابطه بین مقدار پیک جریان تزریق شده به شبکه و مقادیر پیک اکتیو (I_p) و راکتیو (I_q) آن را نشان می‌دهد. بر همین اساس می‌توان مقادیر پیک جریان اکتیو و راکتیو را به ترتیب به صورت روابط زیر نوشت:

$$I_p = I_m \cos(\varphi) \quad (21-3)$$

$$I_q = I_m \sin(\varphi) \quad (22-3)$$



ب



الف

شکل (۳-۱۳) الف) رابطه بین مقدار پیک جریان و مؤلفه‌های اکتیو و راکتیو آن ب) شکل موج‌های ولتاژ شبکه و جریان تزریق شده به آن [۴۳]

شکل (۳-۱۳) ب- شمایی از ولتاژ شبکه و جریان تزریق شده به آن را نشان می‌دهد. در زمان t_p

مقدار جریان تزریق شده به شبکه برابر است با:

$$i_g(t_p) = I_m \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = I_m \cos(\varphi) \quad (۲۳-۳)$$

با توجه به رابطه توان اکتیو $P = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\varphi)$ و رابطه (۲۳-۳)، توان اکتیو خروجی را می‌توان

به صورت زیر نوشت:

$$P_{out} = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\varphi) = \frac{1}{2} V_m i_g(t_p) \quad (۲۴-۳)$$

به صورت مشابه، جریان تزریق شده به شبکه در t_q برابر است با:

$$i_g(t_q) = I_m \sin(\pi - \varphi) = I_m \sin(\varphi) \quad (۲۵-۳)$$

با استفاده از رابطه (۳-۲۵) و رابطه توان راکتیو $Q = \frac{1}{2} V_m I_m \sin(\varphi)$ ، میزان توان راکتیو خروجی

را می‌توان به صورت زیر نوشت:

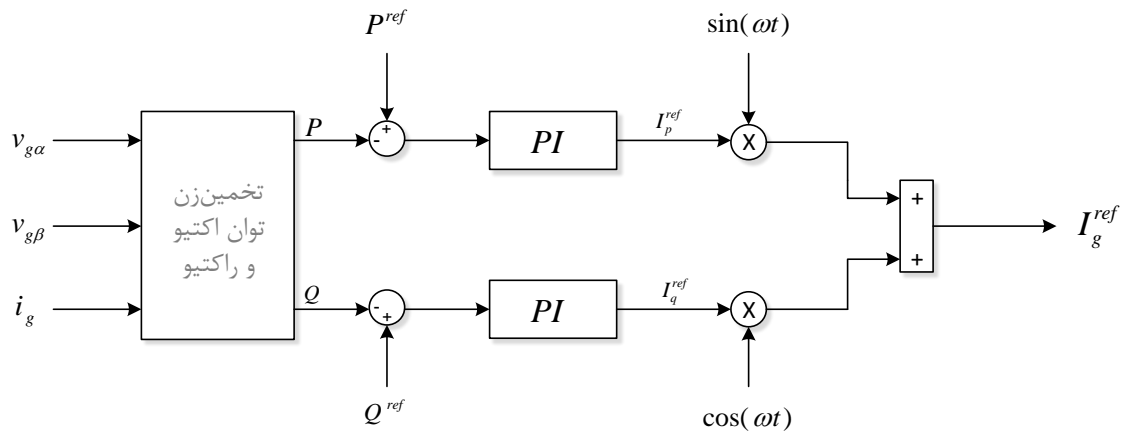
$$Q_{out} = \frac{1}{2} V_m I_m \sin(\varphi) = \frac{1}{2} V_m i_g(t_q) \quad (۳-۲۶)$$

همان‌طور که در شکل (۳-۱۳) ب- مشخص است، برای محاسبه $i_g(t_p)$ کافی است مقدار جریان تزریق شده به شبکه، هنگامی که ولتاژ شبکه در بیشترین مقدار خود قرار دارد (یا مؤلفه عمودی ولتاژ شبکه از صفر عبور می‌کند) اندازه‌گیری شود. جریان $i_g(t_q)$ نیز مقدار جریانی است که در هنگام عبور ولتاژ شبکه از صفر اندازه‌گیری می‌شود. به این ترتیب توان اکتیو و راکتیو تزریق شده به شبکه فقط یک بار در هر سیکل از ولتاژ شبکه محاسبه می‌شود. مزیت این روش نسبت به روش قبل، عدم احتیاج به مؤلفه‌های موازی و عمودی جریان است. به علاوه توان‌ها فقط یک بار در هر سیکل محاسبه می‌شوند که این دو مورد به شدت از حجم محاسبات می‌کاهد.

شکل (۳-۱۴) بلوک دیاگرام کنترل‌کننده توان اکتیو و راکتیو که از ادغام رابطه (۳-۱۷) و روش تخمین توان حاصل شده است را نمایش می‌دهد. مقادیر $v_{g\beta}$ ، $v_{g\alpha}$ ، $\sin(\omega t)$ و $\cos(\omega t)$ توسط سنکرون ساز با شبکه تولید می‌شود که در بخش به آن پرداخته خواهد شد. خطای بین مقدار واقعی توان‌ها و مقادیر مرجع آن‌ها می‌بایست جبران‌سازی شوند. از آنجاکه این خطا مقداری DC است، برای جبران‌سازی آن می‌توان از یک کنترل‌کننده PI استفاده کرد. تابع تبدیل کنترل‌کننده PI استفاده شده به صورت زیر است:

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (۳-۲۷)$$

که K_p ضریب تناسبی و K_i ضریب انتگرال می‌باشد. مقدار K_p برای جبران‌ساز حلقه توان اکتیو برابر با 0.0005 و مقدار K_i نیز 0.25 است. در جبران‌ساز حلقه توان راکتیو، مقدار K_p برابر با 0.0025 و مقدار K_i برابر با 0.25 می‌باشد. این مقادیر بر اساس آزمون و خطا به دست آمده‌اند.



شکل (۱۴-۳) کنترل کننده توان اکتیو و راکتیو

۳-۷-۴ سنکرون ساز با شبکه

در سیستم‌های متصل به شبکه، وجود حلقه قفل فاز (PLL^۱) برای سنکرون سازی خروجی سامانه با شبکه ضروری است. در سامانه PV متصل به شبکه نیز برای سنکرون کردن خروجی اینورتر با شبکه می‌بایست از یک PLL استفاده شود.

یکی از روش‌های پیاده سازی PLL استفاده از دستگاه مرجع دوار است که در بخش ۲-۵-۷ معرفی شد. بلوک دیاگرام PLL این روش که در شکل (۲-۲۴) نشان داده شده است از یک مولد سیگنال عمودی (OSG)، تبدیل پارک (تبدیل $\alpha\beta$ به dq)، یک جبران ساز PI با پهنای باند پایین و نوسان ساز کنترل شده با ولتاژ (VCO) تشکیل شده است.

بلوک OSG در شکل (۲-۲۴)-الف مبتنی بر انتگرال گیر تعمیم یافته مرتبه دوم (SOGI^۲) است که توانایی فیلتر کردن هارمونیک‌های ولتاژ شبکه را داراست [۳۰]. شکل (۲-۲۴)-ب بلوک دیاگرام SOGI را نشان می‌دهد. فرم فضای حالت SOGI به صورت رابطه (۳-۲۸) است.

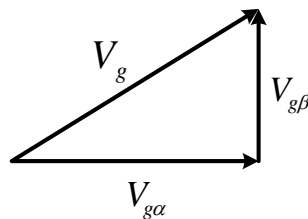
¹ Phase Locked Loop

² Second Order Generalized Integrator

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_p \omega_g & -\omega_g \\ \omega_g & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_p \omega_g \\ 0 \end{bmatrix} [v_g] \quad (28-3)$$

$$\begin{bmatrix} v_{g\alpha} \\ v_{g\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

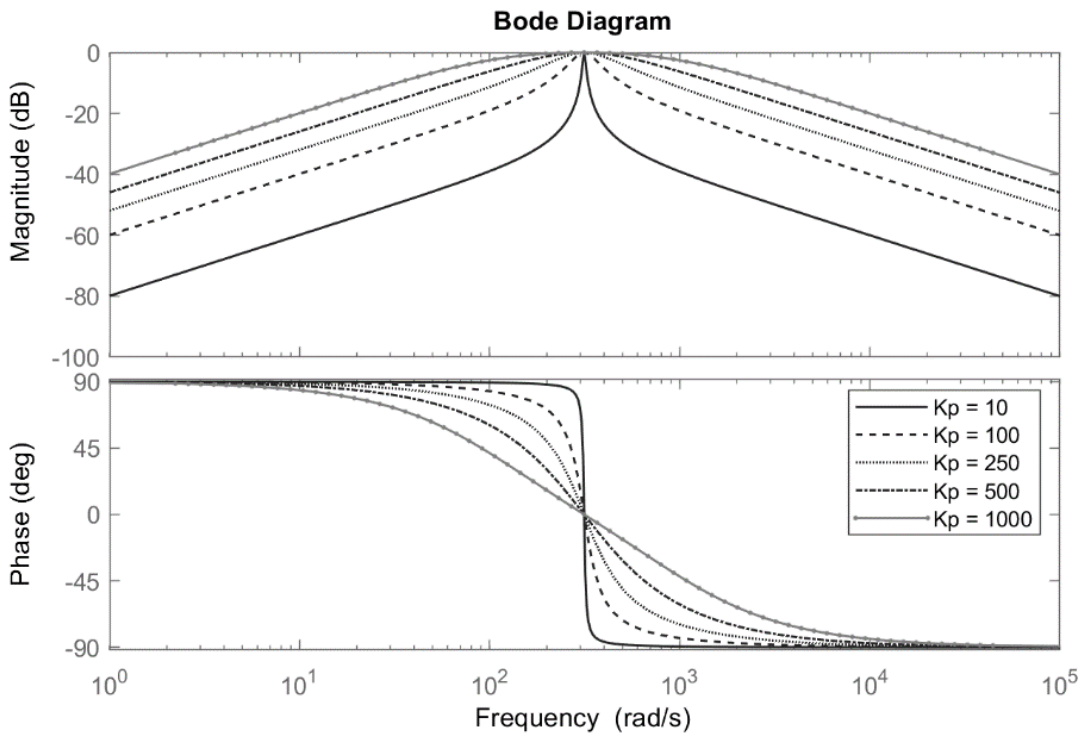
در این رابطه ω_g فرکانس شبکه، v_g ولتاژ شبکه، $v_{g\alpha}$ مؤلفه موازی ولتاژ شبکه، $v_{g\beta}$ مؤلفه عمودی ولتاژ شبکه و K_p ضریب میرایی می‌باشد. رابطه بین $v_{g\alpha}$ ، $v_{g\beta}$ و v_g در دیاگرام فازوری شکل (3-15) نمایش داده شده است.



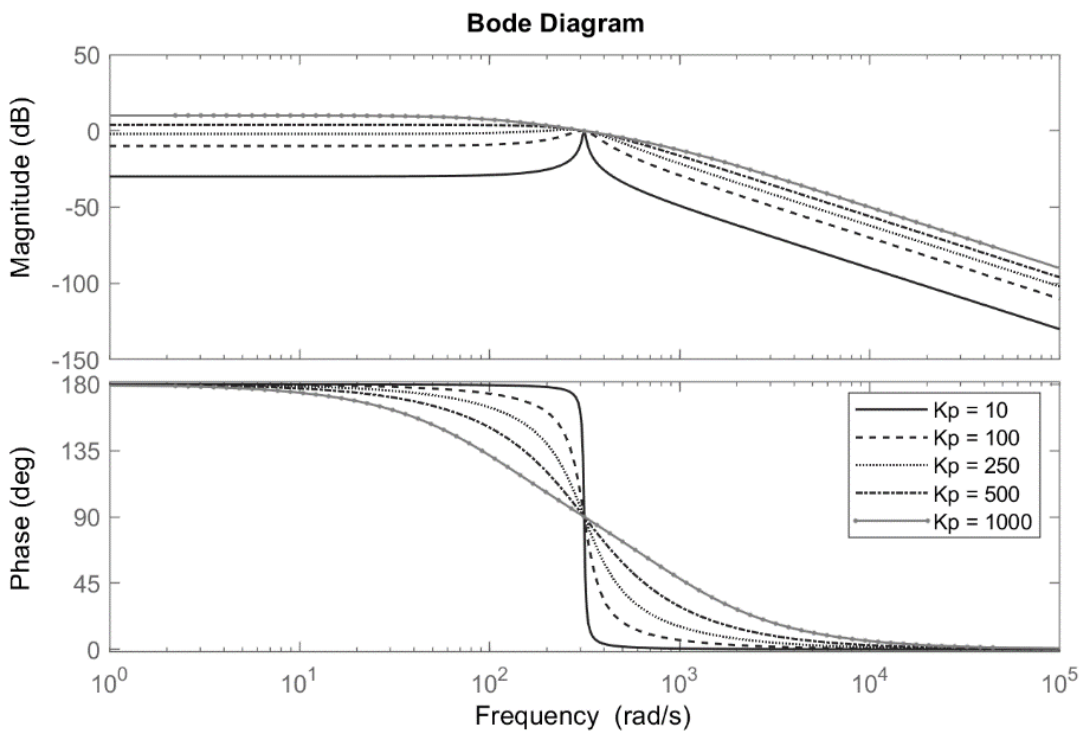
شکل (3-15) دیاگرام فازوری $v_{g\alpha}$ ، $v_{g\beta}$ و v_g

شکل (3-16) پاسخ فرکانسی $\frac{V_{g\alpha}(s)}{V_g(s)}$ را به ازای K_p های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، به ازای تمامی K_p ها، دامنه در فرکانس شبکه برابر یک و زاویه برابر صفر است. بنابراین $v_{g\alpha}$ دارای دامنه‌ای به اندازه v_g است و با v_g هم‌فاز است. از طرفی پاسخ فرکانسی در سایر فرکانس‌ها نشان می‌دهد که SOGI توانسته است سایر فرکانس‌ها را فیلتر کند.

شکل (3-17) پاسخ فرکانسی $\frac{V_{g\beta}(s)}{V_g(s)}$ را به ازای K_p های مختلف نشان می‌دهد. به ازای تمامی K_p ها، دامنه در فرکانس شبکه برابر یک و زاویه برابر 90° درجه است. از این‌رو دامنه $v_{g\beta}$ به اندازه دامنه v_g است ولی با آن 90° درجه اختلاف‌فاز دارد. SOGI در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس شبکه، اعوجاج‌ها و هارمونیک‌ها را فیلتر می‌کند ولی این قابلیت را برای فرکانس‌هایی پایین‌تر از فرکانس شبکه ندارد.

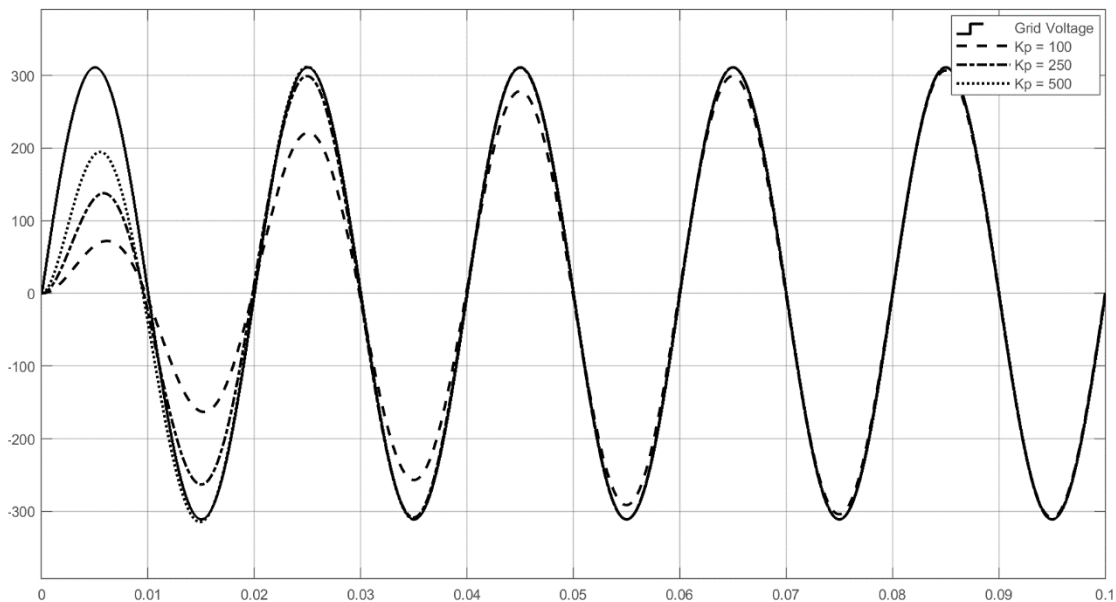


شکل (۱۶-۳) پاسخ فرکانسی $\frac{V_{g\alpha}(s)}{V_g(s)}$ به ازای K_p های مختلف



شکل (۱۷-۳) پاسخ فرکانسی $\frac{V_{g\beta}(s)}{V_g(s)}$ به ازای K_p های مختلف

شکل (۱۸-۳) خروجی SOGI را به ازای K_p های مختلف نشان می‌دهد. بر اساس شکل‌های (۱۶-۳) تا (۱۸-۳) می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش K_p پهنای باند SOGI افزایش می‌یابد و در نتیجه سیگنال‌های موازی و عمود، سریع‌تر v_g را دنبال می‌کنند. از طرف دیگر هرچند افزایش K_p باعث کاهش حساسیت SOGI به تغییرات جزئی فرکانس شبکه می‌شود، اما SOGI را نسبت به نویز در سایر فرکانس‌ها آسیب‌پذیر می‌کند [۱۸]. همان‌طور که در شکل (۱۷-۳) مشخص است به ازای $K_p = 250$ دامنه هارمونیک‌های فرکانس پایین کم‌تر از 0 db است در نتیجه SOGI هارمونیک‌هایی با فرکانس کم‌تر از فرکانس شبکه را تضعیف می‌کند. در شکل (۳-۱۸) که خروجی SOGI به ازای مقادیر مختلف K_p را نشان می‌دهد، در $K_p = 250$ سیگنال v_g به‌طور قابل قبولی توسط $v_{g\alpha}$ دنبال می‌شود. بنابراین مقدار K_p برابر ۲۵۰ انتخاب می‌شود.

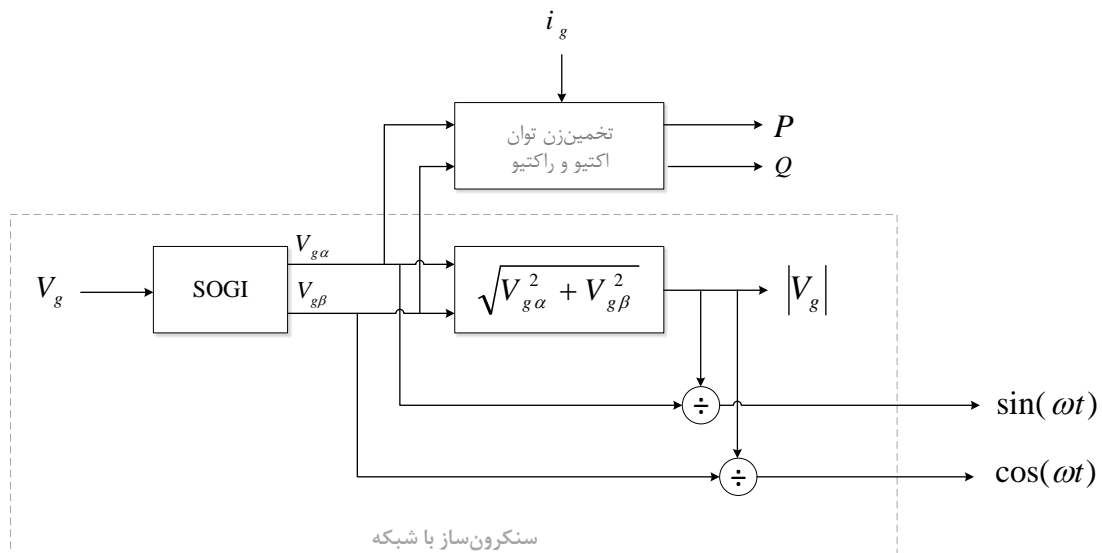


شکل (۱۸-۳) خروجی SOGI: مؤلفه موازی با ولتاژ شبکه به ازای K_p های مختلف

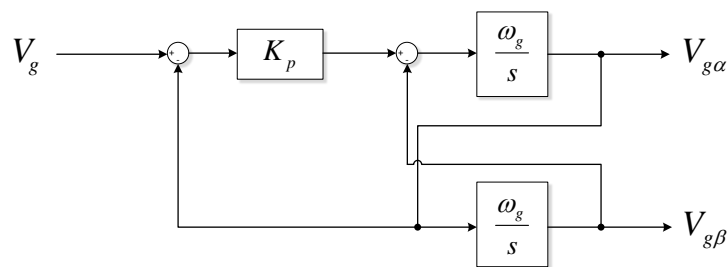
هرچند می‌توان از PLL های [۲۹] و [۳۰] برای سنکرون کردن خروجی اینورتر با شبکه استفاده کرد ولی پیاده‌سازی این روش‌ها به دلیل استفاده از انتگرال، \sin ، \cos و تبدیل پارک پیچیده خواهد

بود. با توجه به پارامترهایی که کنترل کننده توان اکتیو و توان راکتیو به آن نیاز دارد، می توان از روش ساده تری برای سنکرون سازی با شبکه استفاده کرد. شکل (۳-۱۹) شمای سنکرون ساز با ساختاری ساده تر را نشان می دهد. پس از محاسبه $v_{g\alpha}$ و $v_{g\beta}$ توسط SOGI، مقدار دامنه ولتاژ را می توان از رابطه (۳-۲۹) محاسبه کرد. شکل (۳-۲۰) دامنه ولتاژ محاسبه شده از طریق این رابطه را نشان می دهد. با تقسیم $v_{g\alpha}$ و $v_{g\beta}$ بر دامنه ولتاژ، مقادیر $\sin(\omega t)$ و $\cos(\omega t)$ به دست می آید. $v_{g\alpha}$ و $v_{g\beta}$ نیز به عنوان ورودی به بلوک تخمین زن توان داده می شود تا مقادیر توان های اکتیو و راکتیو خروجی سامانه PV تخمین زده شود.

$$|V_g| = \sqrt{v_{g\alpha}^2 + v_{g\beta}^2} \quad (۳-۲۹)$$

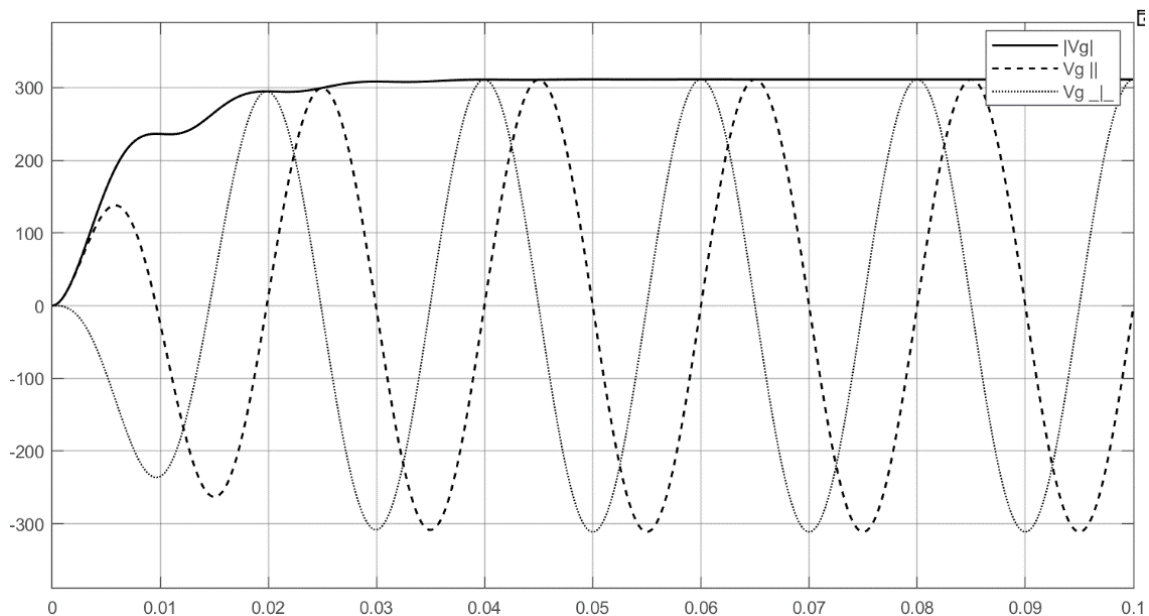


الف



ب

شکل (۳-۱۹) بلوک دیاگرام سنکرون ساز [۳۰] الف) شمای کلی ب) بلوک دیاگرام SOGI



شکل (۳-۲۰) خروجی SOGI، مؤلفه موازی و عمودی ولتاژ شبکه به همراه تخمین دامنه

۳-۸ کنترل توان راکتیو

در فصول قبل اشاره شد که توانایی تزریق و یا مصرف توان راکتیو توسط سامانه فتوولتائیک، این سامانه را علاوه بر یک مولد توان به یک کنترل کننده توان راکتیو نیز تبدیل می کند. کنترل توان راکتیو توسط سامانه PV می تواند بر پایداری شبکه تأثیر مثبت بگذارد. در بخش های قبل، کنترل کننده اینورتر به نحوی طراحی شد تا امکان تزریق و یا مصرف توان راکتیو را نیز برای سامانه PV فراهم کند. با توجه به بلوک کنترل کننده توان اکتیو و راکتیو که در شکل (۳-۱۴) قابل ملاحظه است، میزان توان راکتیوی که سامانه PV می بایست کنترل کند از طریق Q_{ref} در اختیار سیستم کنترل قرار می گیرد. مقدار Q_{ref} می تواند از طریق مرکز کنترل شبکه، که دائماً وضعیت شبکه را بررسی می کند، برای سامانه PV ارسال شود اما در اکثر شبکه های توزیع فعلی، این امکان وجود ندارد. در بخش ۲-۶-۱-۲ استراتژی هایی مطرح شد که میزان جریان های اکتیو و راکتیو مرجع را به کمک ولتاژ شبکه در نقطه PCC تعیین می کرد. به کمک این استراتژی ها و با توجه به سیستم کنترل طراحی شده، استراتژی جدیدی ارائه می شود که میزان توان اکتیو و راکتیو مرجع را برای جبران سازی ولتاژ شبکه تعیین می کند.

در صورتی که در نقطه PCC افت ولتاژ و یا اضافه ولتاژ وجود داشته باشد و یا به دلایل دیگر مانند وقوع خطا در شبکه فلش ولتاژ رخ دهد، سیستم کنترل با استفاده از رابطه زیر، میزان توان راکتیو تزریقی و یا مصرفی را تعیین می‌کند:

$$Q_{ref} = k (1 - V_g) P_n \quad (3-30)$$

در این رابطه k ضریب ثابت، V_g ولتاژ شبکه برحسب پریونیت و P_n توان نامی سامانه PV می‌باشد. نکته قابل توجه این است که میزان k در این رابطه متفاوت با رابطه (2-22) است و به توان نامی سامانه فتوولتائیک وابسته است. میزان بالای k باعث ناپایداری سیستم و مقدار پایین آن باعث عدم استفاده از تمام ظرفیت سامانه فتوولتائیک برای جبران‌سازی ولتاژ شبکه می‌شود؛ بنابراین با توجه به توان نامی سامانه فتوولتائیک با آزمایش مقادیر مختلف k می‌بایست میزان آن تعیین گردد. به ازای توان نامی ۲ کیلووات و با آزمون و خطا مقدار k برابر ۱۸۰ در نظر گرفته می‌شود.

توان ظاهری تزریق شده به شبکه بر اساس ولتاژ مؤثر شبکه و جریان مؤثر تزریق شده به صورت $S = V_g (rms) \times I_g (rms)$ محاسبه می‌شود. توان اکتیو خروجی سامانه PV مقداری محدود است که میزان نامی آن برابر با P_n است. با توجه به رابطه $S = \sqrt{P_n^2 + Q^2}$ به ازای توان اکتیو نامی، با افزایش توان راکتیو، توان ظاهری افزایش می‌یابد. از آنجاکه ولتاژ شبکه ثابت است، این امر موجب افزایش دامنه جریان تزریق شده به شبکه و در نتیجه افزایش جریان عبوری از کلیدها می‌شود. حداکثر جریان عبوری از کلیدها مقداری محدود است و در صورتی که جریان عبوری از این مقدار تجاوز کند به کلید آسیب می‌رساند. انتخاب حد بالاتری برای جریان عبوری از کلید، منجر به افزایش قیمت آن می‌گردد. بنابراین برای این که سامانه PV از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد، می‌بایست در انتخاب مشخصات کلید دقت کافی لحاظ شود. برای مصالحه بین هزینه و توان راکتیو تولیدی و یا مصرفی، حداکثر جریانی که هر کلید می‌تواند تحمل کند ۱/۵ برابر جریان نامی تزریق شده به شبکه در نظر گرفته می‌شود [۳۴]. بنابراین حداکثر توان راکتیوی که سامانه PV در توان نامی می‌تواند تولید و یا مصرف کند، ۱/۱۲ برابر توان نامی

آن است ($Q = 1.12 P_n$). این مقدار در توان‌های اکتیو پایین‌تر می‌توان افزایش یابد ولی حداکثر جریان عبوری از کلیدها نباید از مقدار مجاز آن تجاوز کند. بر این اساس حداکثر مقدار مجاز برای توان راکتیو از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_{max} = \sqrt{S_{max}^2 - P_{out}^2} \quad (31-3)$$

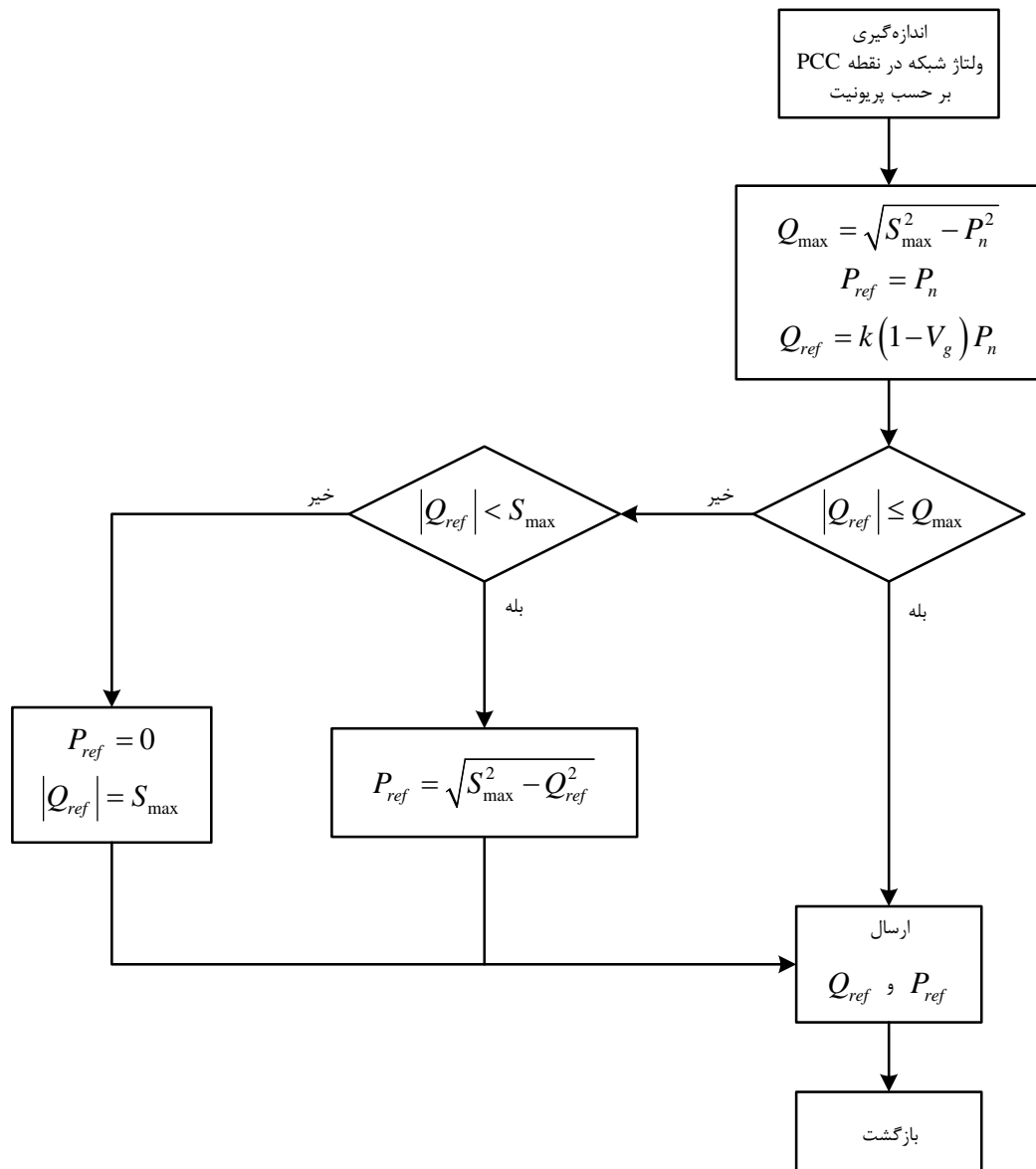
در این رابطه Q_{max} حداکثر توان راکتیو تولیدی یا مصرفی مجاز، P_{out} توان خروجی سامانه PV و S_{max} توان ظاهری حداکثر است که مقدار آن برابر $V_g(rms) \times I_{max}(rms)$ و یا $V_g(rms) \times 1.5 I_n(rms)$ می‌باشد.

با توجه به این‌که توان نامی سامانه PV طراحی شده برابر با ۲ کیلووات است، رابطه (۳۱-۳) را می‌توان به صورت $Q_{max} = \sqrt{9 \times 10^6 - P_{out}^2}$ بازنویسی کرد. بنابراین به ازای تزریق توان اکتیو ۲ کیلوواتی، سامانه PV می‌تواند حداکثر ۲۲۳۶ وار توان راکتیو تولید و یا مصرف کند. در حالتی که فلش ولتاژ رخ می‌دهد، جبران‌سازی ولتاژ شبکه اهمیت بیشتری نسبت به تزریق توان اکتیو پیدا می‌کند. بنابراین در صورتی که مقدار Q_{ref} در رابطه (۳۰-۳) بیشتر از مقدار Q_{max} محاسبه شود، برای ثابت ماندن S_{max} از میزان توان اکتیو خروجی کاسته می‌شود. رابطه زیر میزان توان اکتیو خروجی در این حالت را نشان می‌دهد:

$$P_{out} = \sqrt{S_{max}^2 - Q_{ref}^2} \quad (32-3)$$

ممکن است میزان فلش ولتاژ به قدری شدید باشد که میزان توان راکتیو بسیار بالایی برای جبران آن نیاز باشد. در این صورت ممکن است Q_{ref} بیشتر از S_{max} محاسبه شود. در چنین وضعیتی برای حفاظت از کلیدها در مقابل اضافه جریان، میزان Q_{ref} برابر S_{max} و میزان توان اکتیو خروجی سامانه (P_{out}) برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود و تمام تمرکز سامانه PV بر روی جبران‌سازی ولتاژ شبکه معطوف می‌شود. در صورتی که قبل از اتمام زمان مقرر که در بخش ۲-۱-۶-۲ به آن پرداخته شد، فلش

ولتاژ رفع گردد، عملکرد سامانه به وضعیت عادی برمی گردد؛ در غیر این صورت سامانه PV می بایست از شبکه جدا شود. بر اساس مطالبی که مطرح شد، الگوریتم این روش به صورت شکل (۳-۲۱) خواهد بود.



شکل (۳-۲۱) استراتژی پیشنهادی برای کنترل توان راکتیو

۹-۳ جمع‌بندی

در این فصل تمامی پارامترهای سامانه PV شامل توان نامی سامانه، پنل‌های خورشیدی، مبدل بوست، خازن لینک DC و فیلتر LCL طراحی شدند. سپس برای ردیابی نقطه حداکثر توان از الگوریتم P&O برای کنترل مبدل بوست استفاده شد. این الگوریتم برای استخراج بیشترین توان از پنل‌های خورشیدی، توان و ولتاژ خروجی در هر سیکل را با سیکل قبل مقایسه می‌کند و در صورتی که تغییراتی در این مقادیر اتفاق افتاده باشد، با تغییر سیکل وظیفه مبدل بوست، نقطه حداکثر توان را ردیابی می‌کند. سپس سیستم کنترل اینورتر که شامل سه بخش کنترل‌کننده جریان، کنترل‌کننده توان و سنکرون‌ساز با شبکه است، طراحی شده و پایداری آن مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت یک استراتژی برای تعیین میزان توان اکتیو و راکتیو مرجع جهت جبران‌سازی ولتاژ شبکه ارائه شد. جدول (۳-۵) کلیه پارامترهای طراحی شده برای سامانه فتوولتائیک را نشان می‌دهد. عملکرد سامانه طراحی شده در فصل بعد مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

جدول (۳-۵) پارامترهای طراحی شده سامانه PV

مقدار	پارامتر
۲ kW	توان نامی (P_n)
۲۲۰ V (RMS)	ولتاژ نامی شبکه (V_g)
۵۰ Hz	فرکانس شبکه (f_g)
هریک	ساختار اینورتر
۲۰ kHz	فرکانس کلیدزنی (f_{sw})
۴۰۰ V	ولتاژ لینک DC (V_{dc})
۰/۳ mH	سلف مبدل بوست (L_{boost})
۸۰۰ μF	خازن لینک DC (C_{dc})
فیلتر LCL	
۱/۷ mH	سلف سمت اینورتر (L_i)
۸۷ μH	سلف سمت شبکه (L_g)
۶/۶ μF	خازن موازی (C_f)
۱/۱۸۵ Ω	مقاومت میرا کننده (R_d)
جبران ساز PR	
۰/۱	ضریب تناسبی (K_p)
۲۰	ضریب رزونانس (K_r)
۰/۰۱	ضریب میرا کننده (ξ)
تضعیف کننده هارمونیک سوم	
۰/۰۱	ضریب رزونانس (K_{r3})
جبران ساز PI حلقه کنترلی توان اکتیو	
۰/۰۰۰۵	ضریب تناسبی (K_p)
۰/۲۵	ضریب انتگرال گیر (K_i)
جبران ساز PI حلقه کنترلی توان راکتیو	
۰/۰۰۲۵	ضریب تناسبی (K_p)
۰/۲۵	ضریب انتگرال گیر (K_i)
سنکرون ساز با شبکه	
۲۵۰	ضریب میرا کننده (ξ)



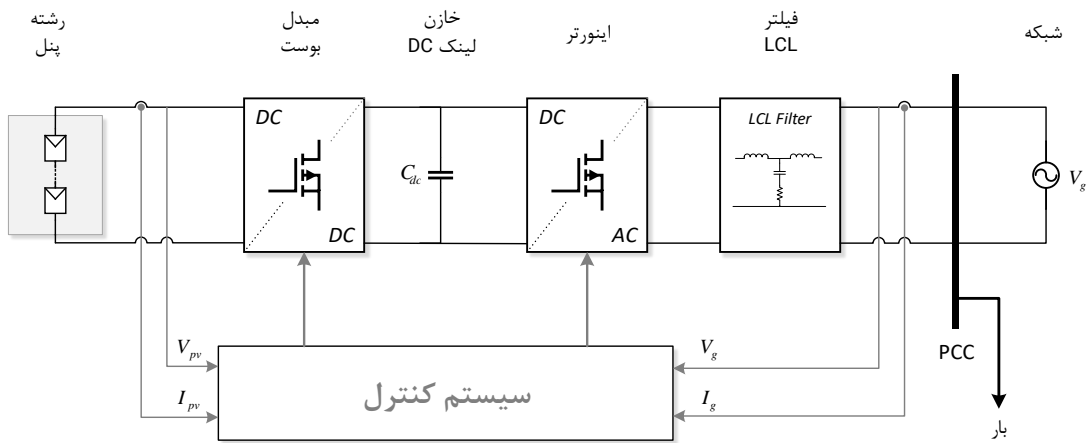
فصل ۴

شبیه‌سازی و نتایج

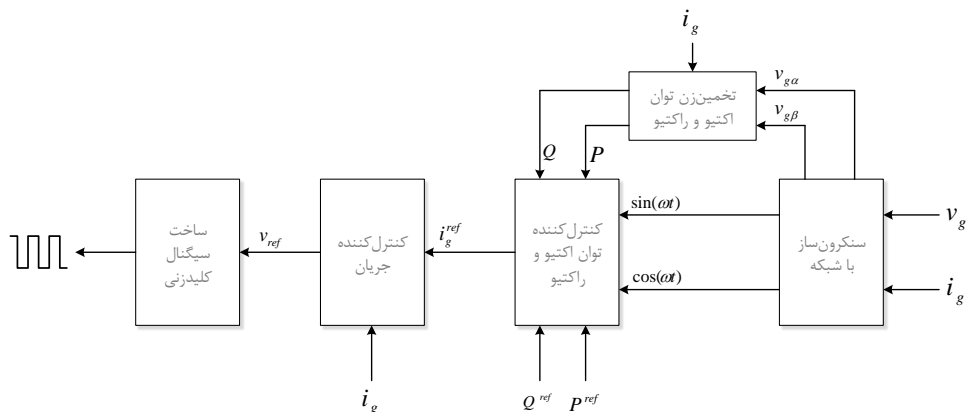


۱-۴ مقدمه

در فصل قبل به طراحی سامانه فتوولتائیک، طراحی سیستم کنترل و ارائه استراتژی کنترل توان راکتیو پرداخته شد. شکل (۱-۴) شمای کلی از سامانه PV و سیستم کنترل اینورتر را نشان می‌دهد. پارامترهای سامانه که در فصل قبل طراحی شد در جدول (۳-۵) لیست شده است. شبکه، یک منبع ولتاژ ۲۲۰ ولتی به همراه یک سلف سری با مقدار ۲ mH می‌باشد. مقدار بار در نقطه PCC برابر با ۵ kVA با ضریب توان ۰/۹ است. بر اساس پارامترهای طراحی شده، سامانه مذکور در Simulink نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است که در ادامه فصل به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی پرداخته خواهد شد.



الف



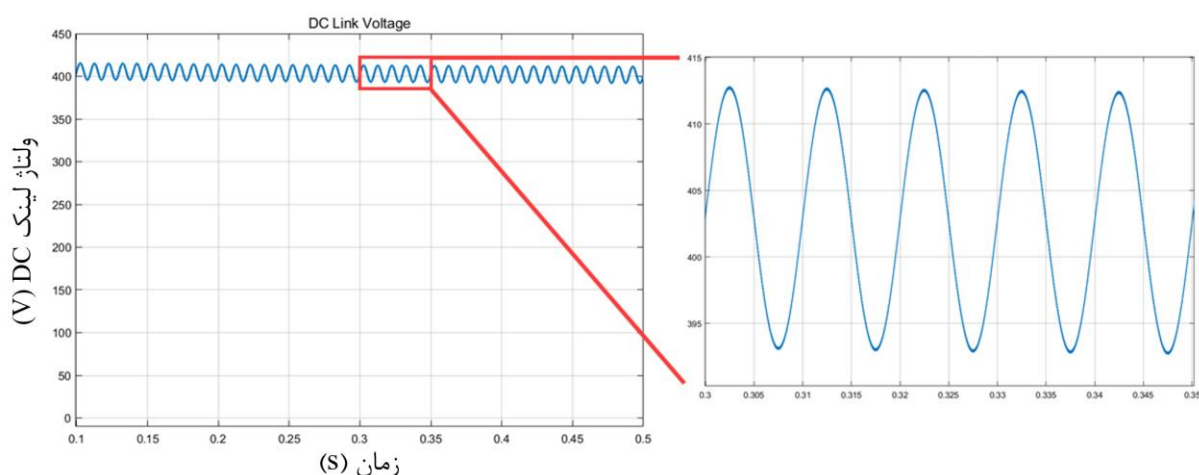
ب

شکل (۱-۴) سامانه فتوولتائیک (الف) شمای کلی (ب) سیستم کنترل اینورتر

۲-۴ ارزیابی عملکرد اجزای مختلف سامانه فتوولتائیک

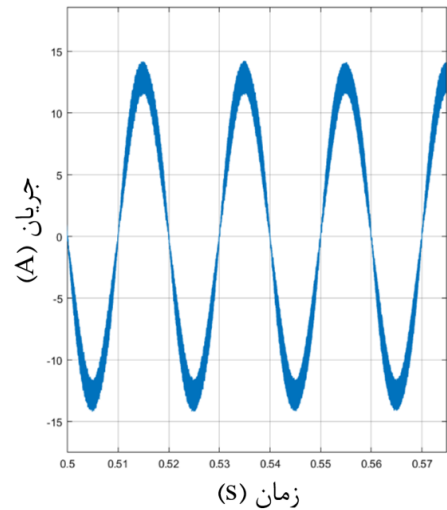
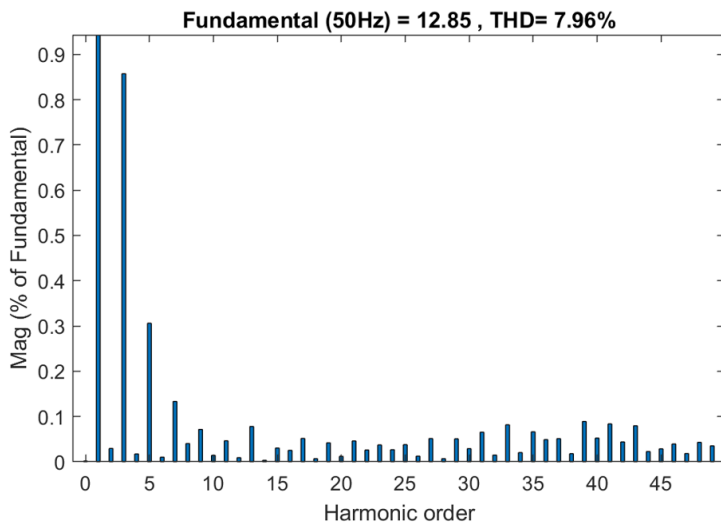
در این بخش عملکرد اجزای مختلف سامانه فتوولتائیک شامل خازن لینک DC، جبران ساز PR و فیلتر LCL مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این ارزیابی در شرایطی انجام شده است که میزان تابش نور خورشید 1 kW/m^2 و دمای محیط 25 درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

شکل (۲-۴) ولتاژ لینک DC را نمایش می‌دهد. مقدار DC این ولتاژ حدود 400 ولت و میزان رپل آن 5 درصدی است که خازن برای آن طراحی شده است.



شکل (۲-۴) ولتاژ لینک DC

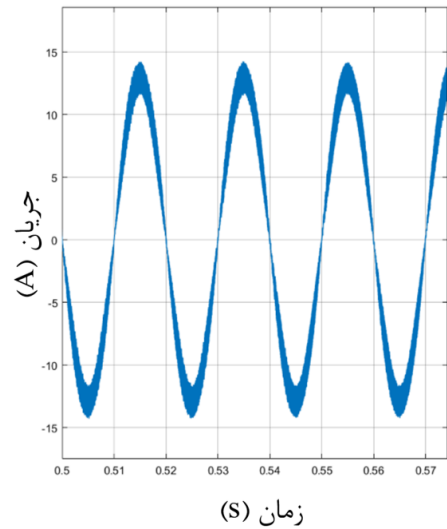
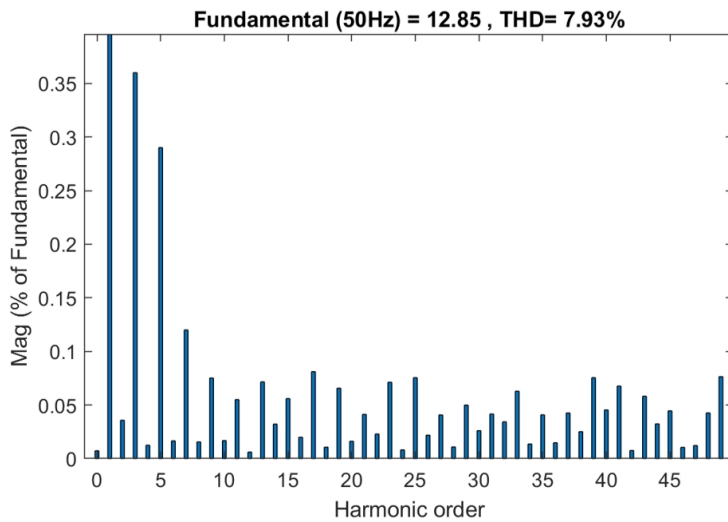
در بخش ۲-۷-۳ بیان شد که اضافه شدن تضعیف‌کننده هارمونیک سوم به جبران ساز PR می‌تواند میزان THD خروجی جریان را بهبود بخشد. شکل (۳-۴) جریان خروجی اینورتر را در بدون این تضعیف‌کننده و شکل (۴-۴) جریان را در حضور آن نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۳-۴) ب، میزان هارمونیک سوم مقدار قابل توجهی است (0.87 درصد) که به کمک تضعیف‌کننده هارمونیک سوم به 0.35 درصد کاهش یافته است.



ب

الف

شکل (۳-۴) جریان خروجی اینورتر بدون تضعیف کننده هارمونیک سوم



ب

الف

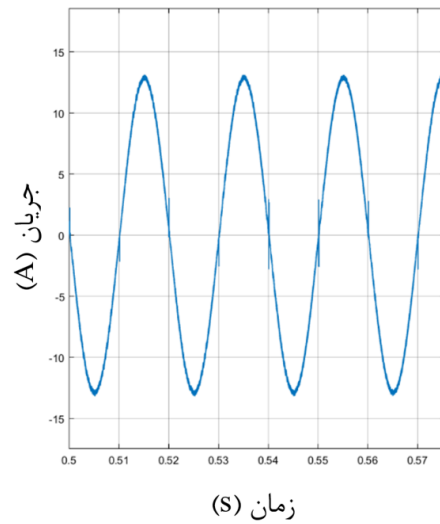
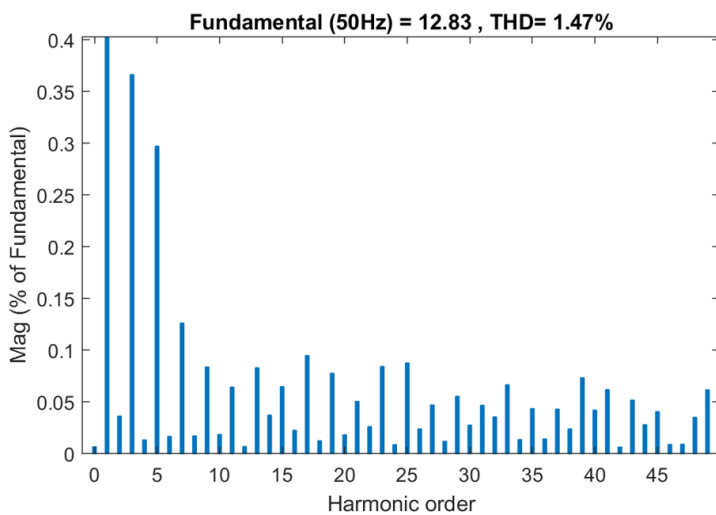
شکل (۴-۴) جریان خروجی اینورتر در حضور تضعیف کننده هارمونیک سوم

پس از اینکه جریان خروجی اینورتر که در شکل (۴-۴) نمایش داده شد از فیلتر LCL می‌گذرد

میزان THD آن از ۷/۹۳ درصد که از نظر قوانین شبکه مقدراری غیرقابل قبول محسوب می‌شود به ۱/۴۷

درصد که در شکل (۵-۴) نمایش داده شده است، کاهش می‌یابد. این مورد نشان دهنده این است که

فیلتر LCL به خوبی توانسته است میزان THD جریان خروجی اینورتر را کاهش دهد.

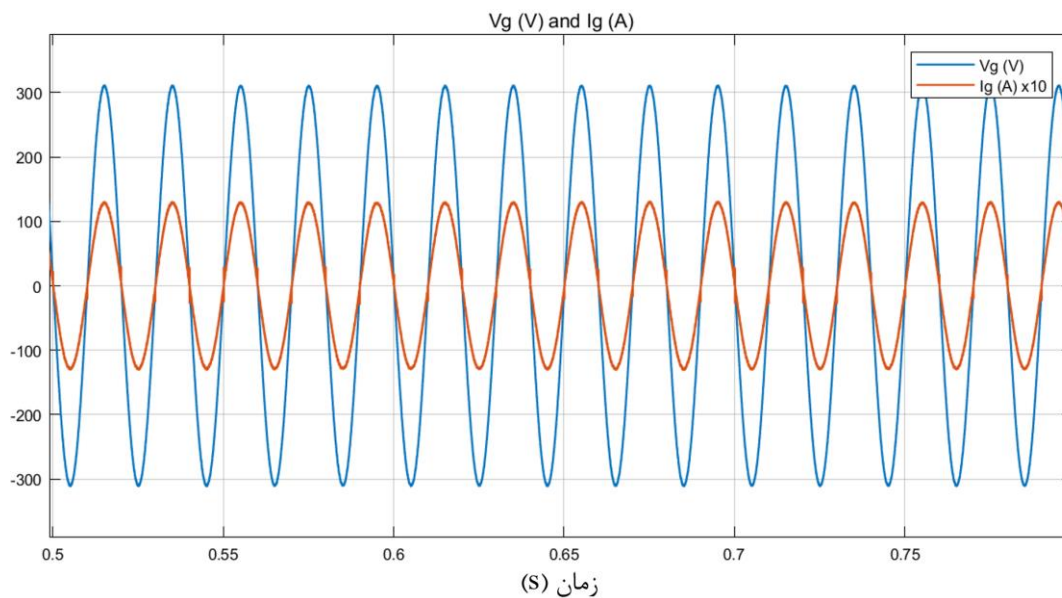


الف
ب
شکل (۴-۵) جریان خروجی سامانه فتوولتائیک پس از عبور از فیلتر LCL

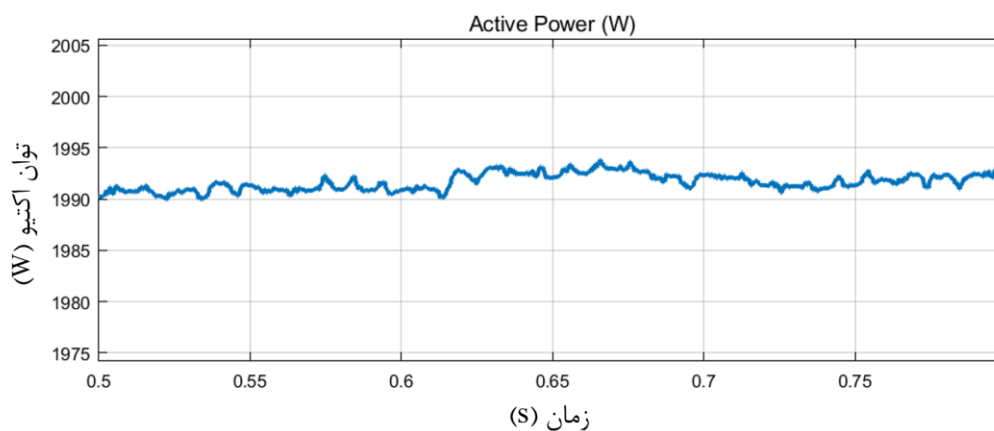
۳-۴ عملکرد سامانه فتوولتائیک در ضریب توان واحد

بر اساس استاندارد ۱۱۸۵۹ ملی ایران، در صورتی که سامانه فتوولتائیک قصد تزریق توان راکتیو نداشته باشد می‌بایست در ضریب توان واحد کار کند. از این رو عملکرد سامانه در این وضعیت بسیار مهم بوده و می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد.

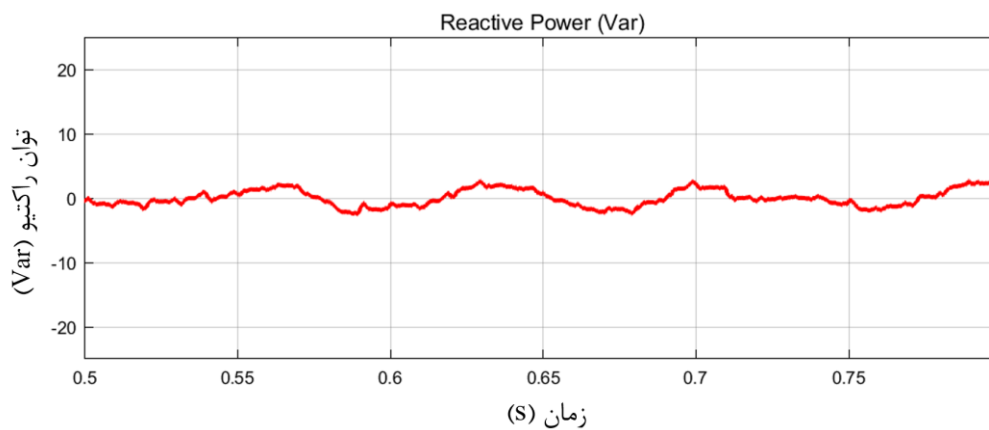
شکل (۴-۶) ولتاژ، جریان، توان اکتیو و توان راکتیو خروجی سامانه فتوولتائیک را در ضریب توان واحد نشان می‌دهد. توان خروجی حدود ۱۹۹۰ وات است. علت افت توان، عدم بازده صددرصدی الگوریتم P&O است که میزان توان اکتیو مرجع را تعیین می‌کند. میزان توان راکتیو جابجا شده بین شبکه و سامانه تقریباً برابر با صفر است که نشان‌دهنده صحت عملکرد سیستم کنترل است. بر اساس شکل (۴-۵)، میزان THD جریان خروجی حدود ۱/۵ درصد است که مقدار آن کم‌تر از ۵ درصدی است که استاندارد ۱۱۸۵۹ تعیین کرده است.



الف



ب



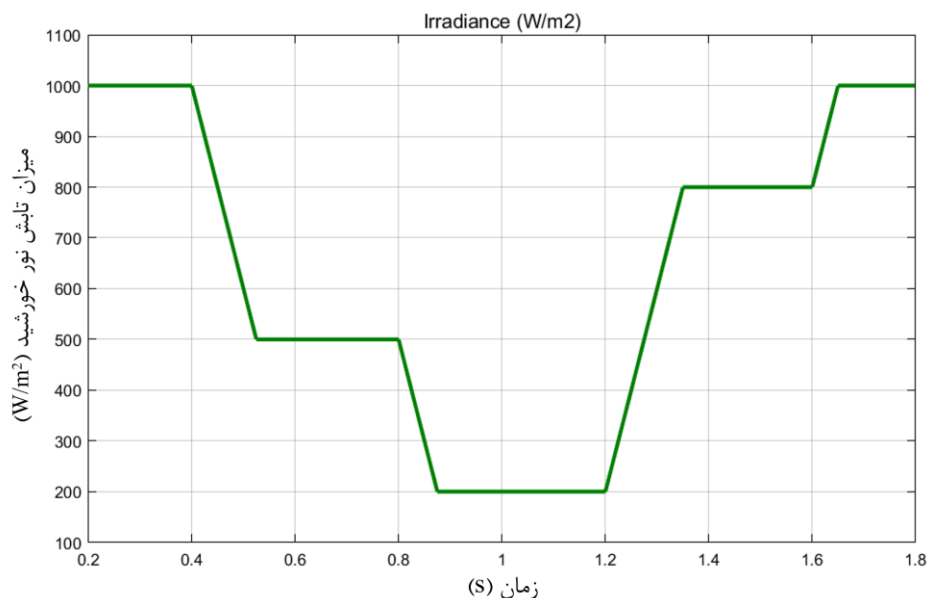
ج

شکل (۴-۶) خروجی سامانه فتوولتائیک در ضریب توان واحد الف) ولتاژ در نقطه اتصال مشترک (V) و جریان خروجی (۱۰×A) ب) توان اکتیو خروجی سامانه ج) توان راکتیو خروجی سامانه

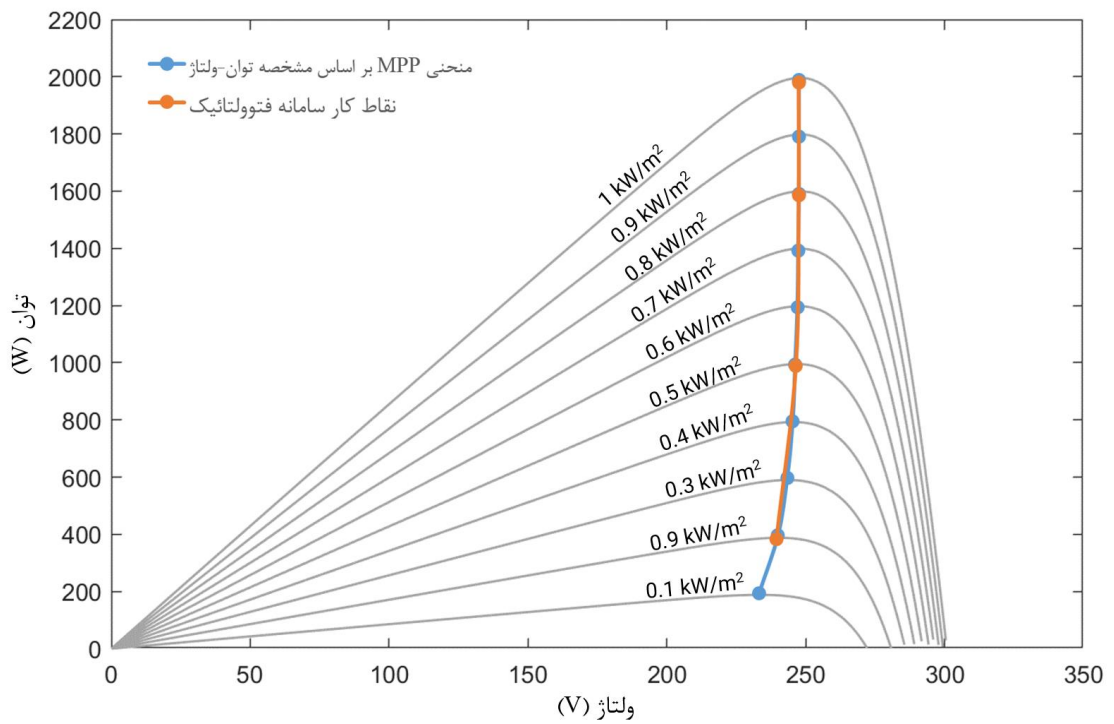
در بخش ۲-۴-۲ مطرح شد که تغییر تابش خورشید و یا دمای محیط بر روی توان خروجی سامانه تأثیرگذار است. عملکرد سامانه به ازای تغییر میزان تابش و دما در بخش‌های ۱-۳-۴ و ۲-۳-۴ مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر اساس طراحی سیستم کنترل سامانه فتوولتائیک، امکان تغییر توان اکتیو مرجع وجود دارد. عملکرد سامانه در این حالت در بخش ۳-۳-۴ مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۳-۴ عملکرد سامانه در هنگام تغییر تابش نور خورشید

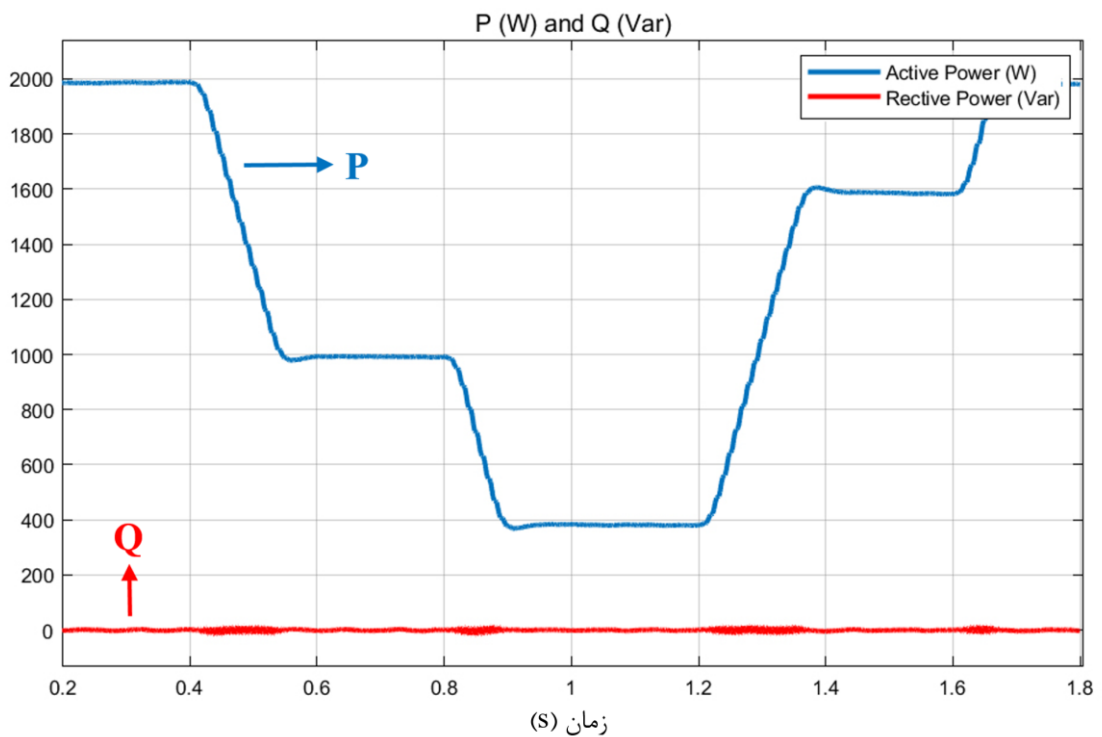
با توجه به مطالب مطرح‌شده در بخش ۲-۴-۲، با کاهش تابش نور خورشید میزان توان خروجی پنل‌ها کاهش می‌یابد. در این وضعیت الگوریتم P&O وظیفه دارد نقطه حداکثر توان را پیدا کند تا حداکثر توان ممکن از پنل‌ها استخراج شود. شکل (۷-۴) میزان تابش نور خورشید که به‌عنوان ورودی به بلوک پنل خورشیدی متلب داده شده است را نمایش می‌دهد. بر اساس شکل (۸-۴) الف که منحنی MPP و نقاط کار سامانه فتوولتائیک را در مقادیر مختلف تابش نور خورشید نمایش می‌دهد، الگوریتم P&O توانسته است با تغییر تابش نور خورشید نقاط حداکثر توان را ردیابی کند. همچنین شکل (۸-۴) ب نشان می‌دهد که سامانه فتوولتائیک حداکثر توان استخراج‌شده از پنل‌های خورشیدی را به شبکه تزریق کرده است.



شکل (۷-۴) میزان تابش نور خورشید اعمال‌شده به سامانه فتوولتائیک



الف

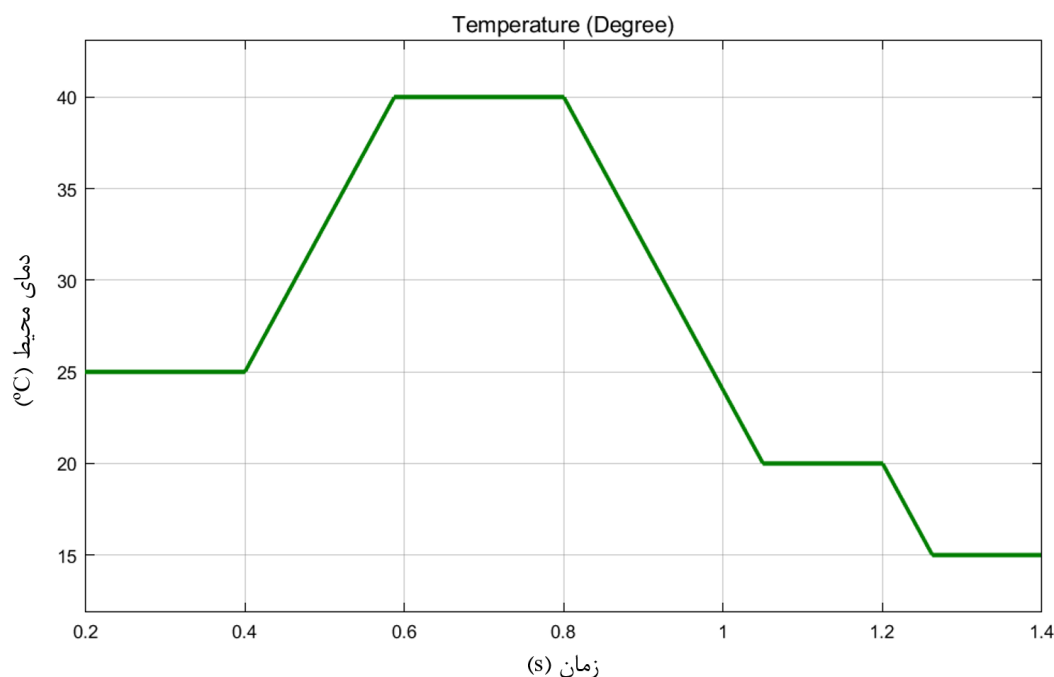


ب

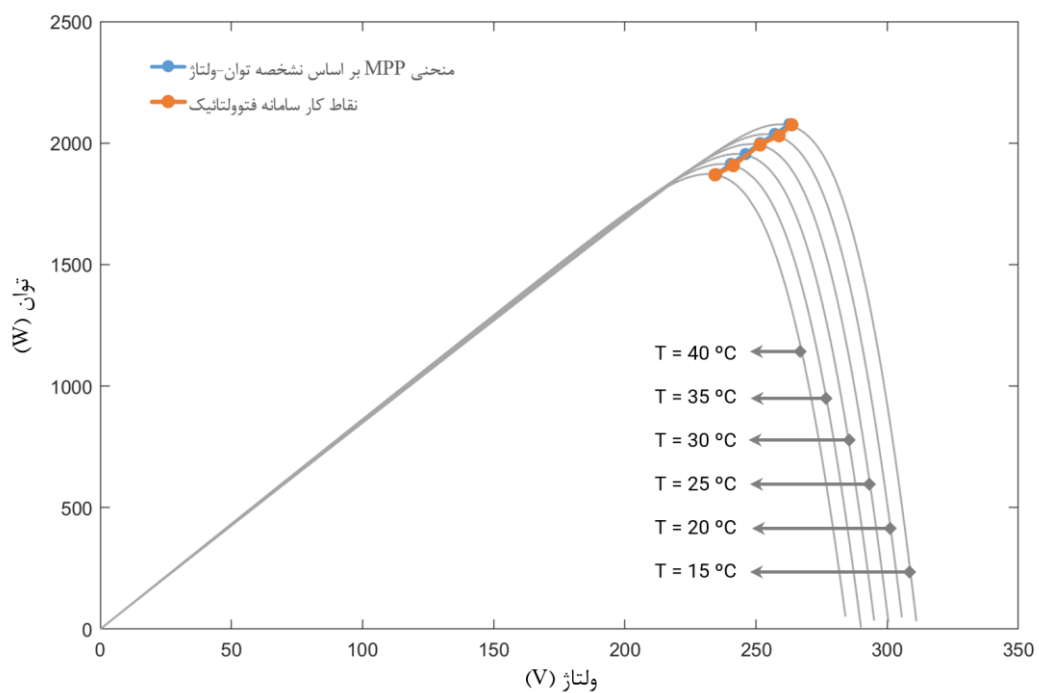
شکل (۴-۸) عملکرد سامانه فتوولتائیک در هنگام تغییر تابش نور خورشید (الف) منحنی MPP و نقاط کار سامانه به ازای مقادیر مختلف تابش در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (ب) توان اکتیو (W) و توان راکتیو (Var) در خروجی سامانه فتوولتائیک

۲-۳-۴ عملکرد سامانه در هنگام تغییر دمای محیط

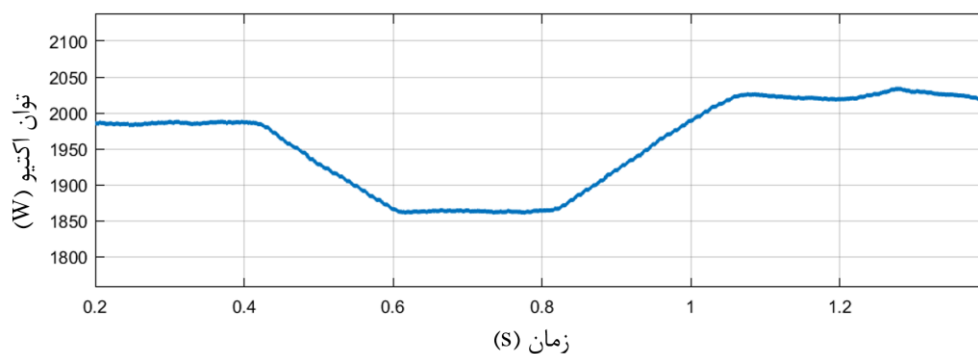
در بخش ۲-۴-۲ اشاره شد که تغییرات دمای محیط بر روی خروجی پنل‌های خورشیدی تأثیرگذار است. برای بررسی عملکرد سامانه فتوولتائیک در هنگام تغییر دمای محیط، این تغییرات به‌عنوان ورودی به بلوک متلب داده می‌شود که میزان آن در شکل (۹-۴) قابل مشاهده است. بر اساس شکل (۴-۱۰) الف که منحنی MPP و نقاط کار سامانه فتوولتائیک را به ازای تغییر دمای محیط نمایش می‌دهد، الگوریتم P&O توانسته است با تغییر دمای محیط به ردیابی نقطه حداکثر توان پرداخته و در نتیجه حداکثر توان ممکن را از پنل‌های خورشیدی استخراج نماید. بر اساس شکل‌های (۴-۱۰) ب و (۴-۱۰) ج، سامانه فتوولتائیک توانسته است میزان توان حداکثری که توسط الگوریتم P&O استخراج شده است را در ضریب توان واحد به شبکه تزریق نماید.



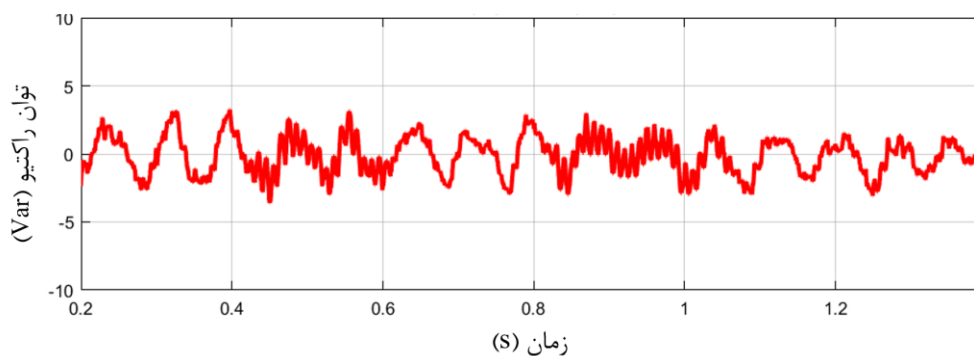
شکل (۹-۴) میزان دمای محیط اعمال شده به سامانه فتوولتائیک



الف



ب



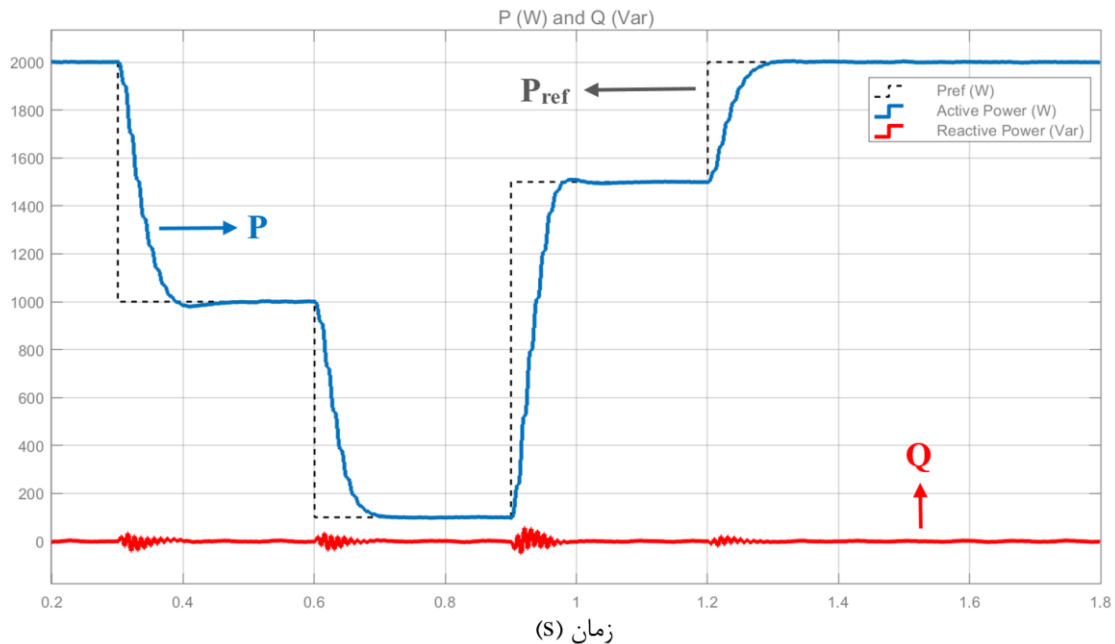
ج

شکل (۴-۱۰) عملکرد سامانه فتوولتائیک در هنگام تغییر دمای محیط الف) منحنی MPP و نقاط کار سامانه به ازای مقادیر مختلف دما در تابش ۱ کیلووات بر مترمربع ب) توان اکتیو خروجی سامانه ج) توان راکتیو خروجی سامانه

۳-۳-۴ عملکرد سامانه در هنگام تغییر توان اکتیو مرجع

در بلوک کنترل توان اکتیو امکان تعیین میزان توان اکتیو خروجی مرجع وجود دارد. همان طور که در بخش ۲-۶ مطرح شد، با افزایش تمرکز مولدهای فتوولتائیک در یک محدوده، احتمال رخ دادن اضافه ولتاژ وجود دارد. یکی از روش‌های حل این مشکل، کاهش توان خروجی سامانه فتوولتائیک در بازه زمانی که اضافه ولتاژ رخ داده است می‌باشد. بنابراین ارزیابی سامانه فتوولتائیک در هنگام تغییر توان اکتیو مرجع مفید خواهد بود.

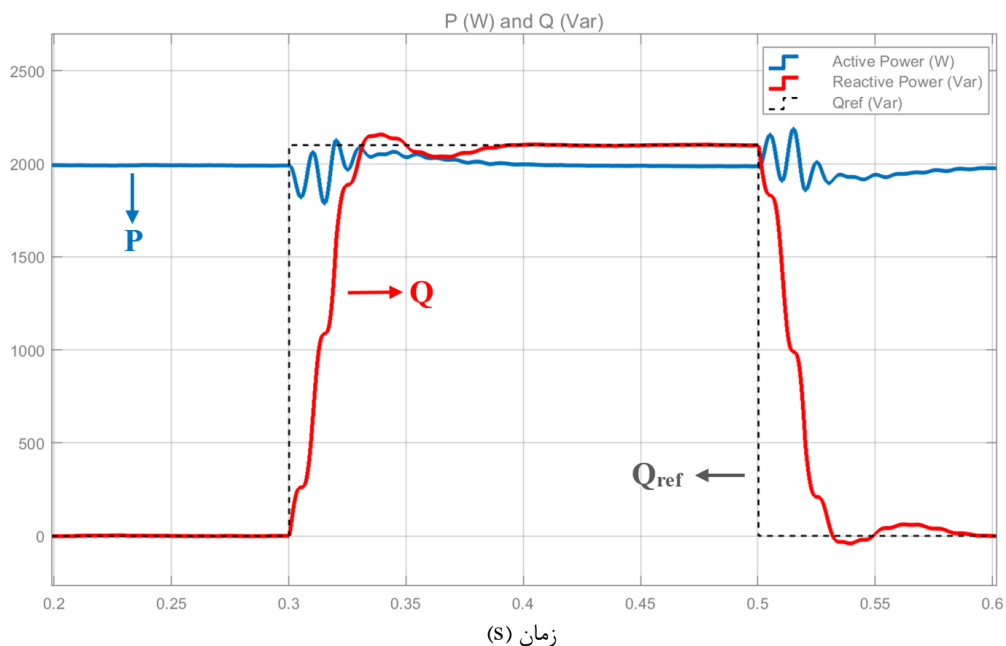
شکل (۴-۱۱) توان اکتیو مرجع، توان اکتیو خروجی و توان راکتیو را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، توان اکتیو مرجع در بازه‌های زمانی مختلف برابر ۱۰۰۰، ۱۰۰ و ۱۵۰۰ وات قرار داده شده است. سیستم کنترل توانسته است به خوبی توان اکتیو مرجع را دنبال نماید..



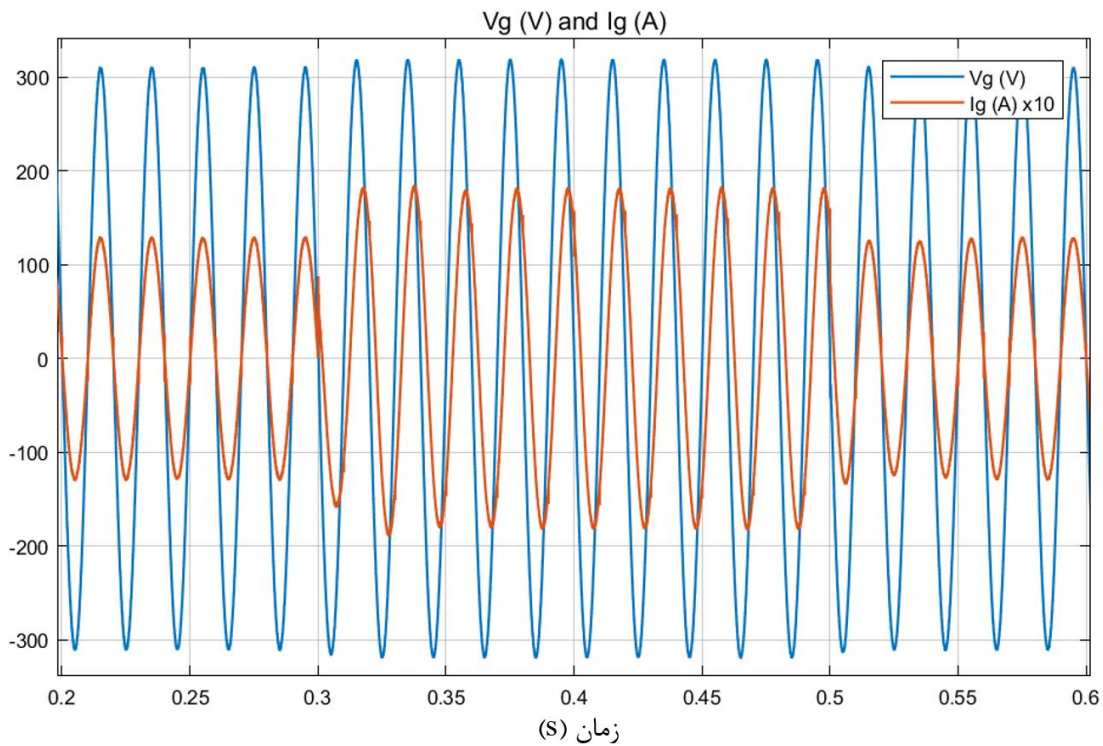
شکل (۴-۱۱) خروجی سامانه فتوولتائیک با تغییر توان اکتیو مرجع: توان اکتیو مرجع (W)، توان اکتیو خروجی (W) و توان راکتیو خروجی (Var)

۴-۴ عملکرد سامانه فتوولتائیک در کنترل توان راکتیو

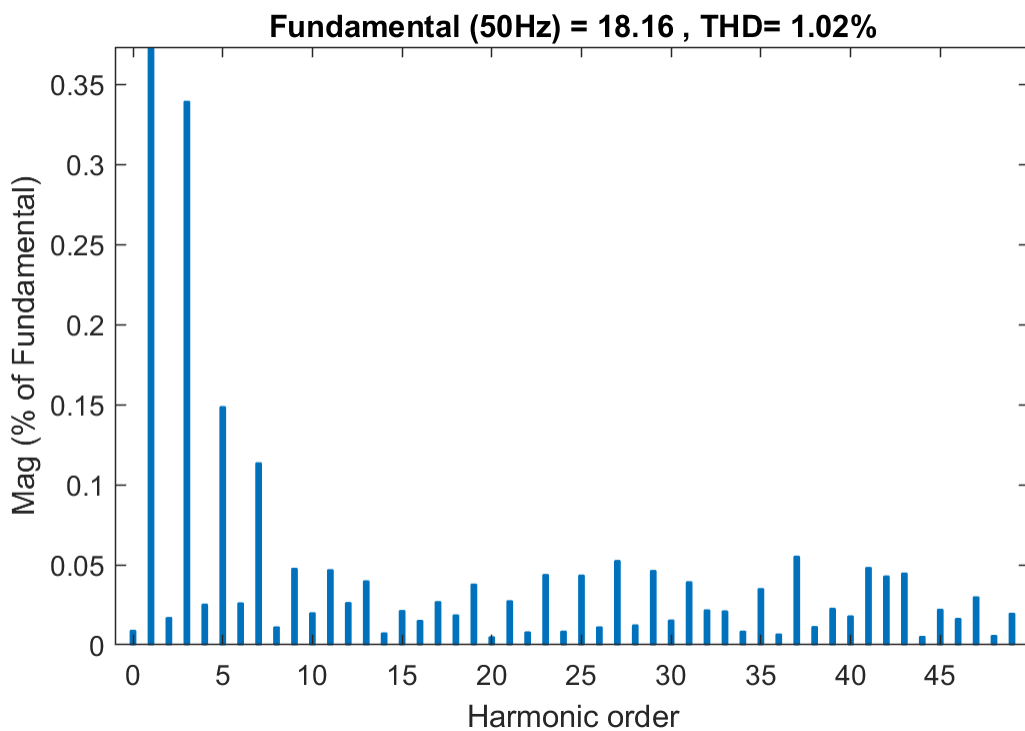
هدف اصلی در این پایان نامه طراحی سامانه فتوولتائیکی است که امکان کنترل توان راکتیو را داشته باشد. کنترل کننده توان که در سیستم کنترل سامانه فتوولتائیک استفاده شد، امکان دریافت میزان توان راکتیو مرجع را دارد. در ابتدا توان راکتیو مرجع برابر با $+2100$ وار در نظر گرفته می شود. شکل (۴-۱۲) توان اکتیو و راکتیو خروجی سامانه را نشان می دهد. همان طور که در شکل نمایش داده شده است، توان راکتیو در کم تر از 100 میلی ثانیه به مقدار مرجع خود رسیده است. شکل (۴-۱۳) ولتاژ سامانه و جریان خروجی آن را (با بزرگنمایی 10 برابر) نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشخص است، با تزریق توان راکتیو (به دلیل افزایش توان ظاهری) دامنه جریان افزایش یافته و نسبت به ولتاژ حالتی پیش فاز پیدا کرده است. همچنین به دلیل تزریق توان راکتیو، ولتاژ شبکه در نقطه PCC نیز افزایش یافته است. میزان THD جریان در شکل (۴-۱۳) قابل مشاهده است. تزریق توان راکتیو باعث شده است تا میزان THD جریان خروجی نسبت به حالتی که سامانه PV توان اکتیو را با ضریب توان واحد به شبکه تزریق می کند، کاهش یابد.



شکل (۴-۱۲) توان اکتیو (W) و توان راکتیو (Var) خروجی سامانه فتوولتائیک به ازای اعمال $2/1$ کیلووار به عنوان توان راکتیو مرجع به سیستم کنترل

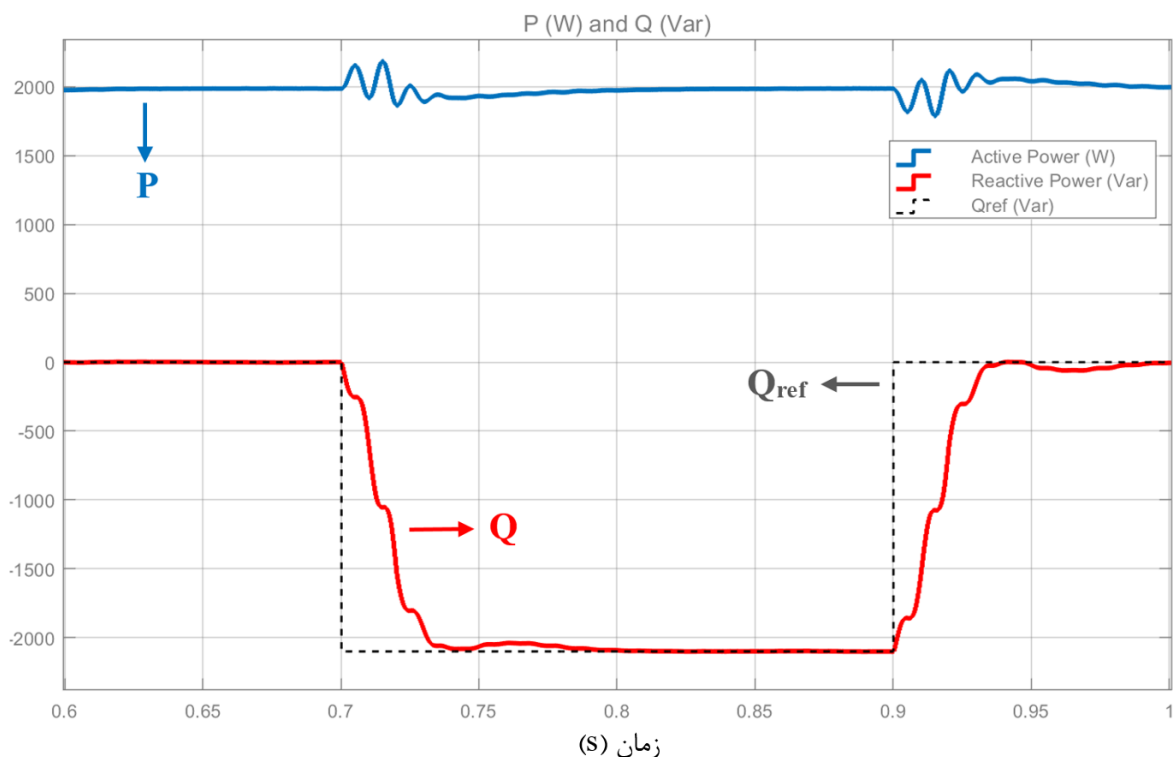


شکل (۴-۱۳) ولتاژ شبکه در نقطه اتصال مشترک (V) و جریان خروجی سامانه فتوولتائیک ($10 \times A$) به ازای اعمال ۲/۱ کیلووار به عنوان توان راکتیو مرجع به سیستم کنترل

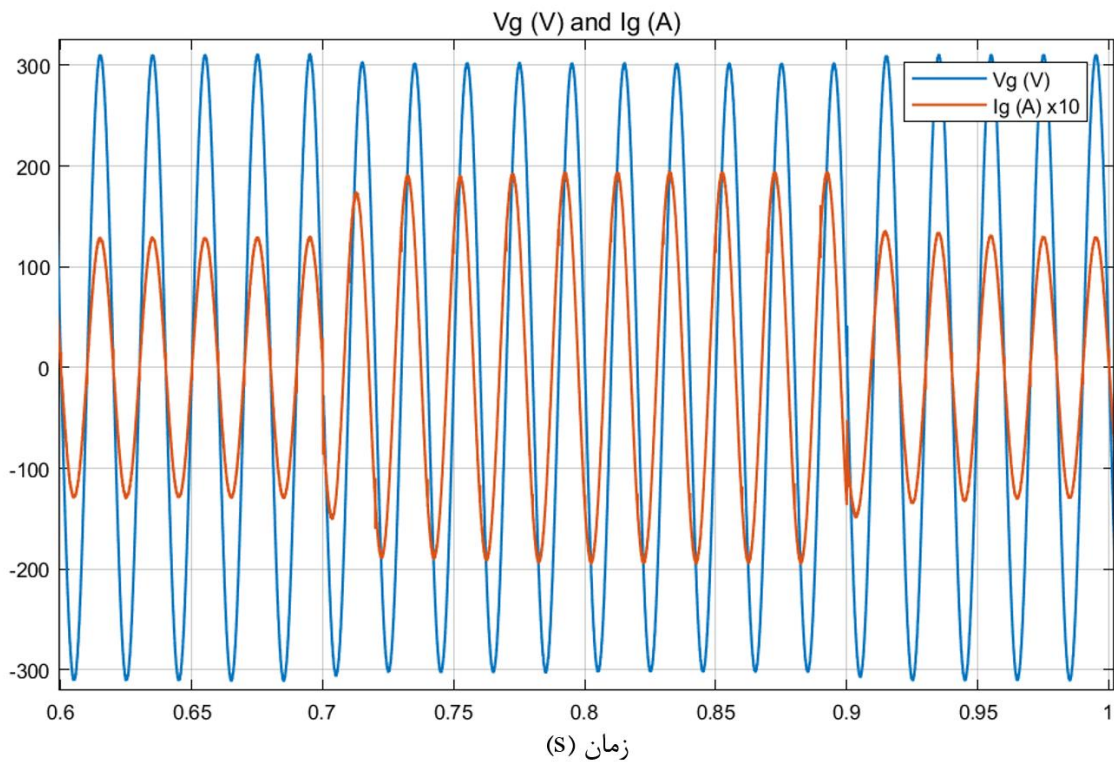


شکل (۴-۱۴) میزان هارمونیک‌های جریان خروجی سامانه فتوولتائیک هنگام تزریق ۲/۱ کیلووار توان راکتیو به شبکه

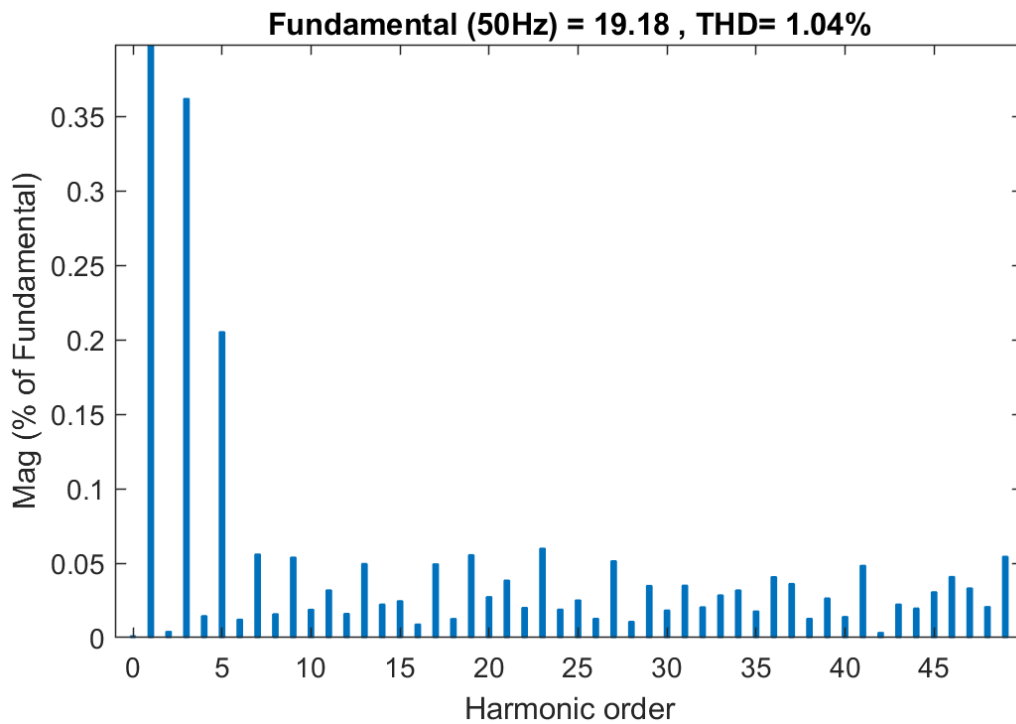
برای ارزیابی توانایی سامانه فتولتائیک در مصرف توان راکتیو، میزان توان راکتیو مرجع برابر با ۲۱۰۰- وار در نظر گرفته شده است. توان‌های خروجی سامانه در شکل (۴-۱۵) نمایش داده شده است. بر اساس این شکل سیستم کنترل سامانه توانسته است میزان توان راکتیو مرجع را دنبال کند. شکل (۴-۱۶) ولتاژ و جریان خروجی را نمایش می‌دهد. در این شکل می‌توان افزایش دامنه جریان خروجی و پس‌فاز شدن آن نسبت به ولتاژ را مشاهده کرد. به‌علاوه همان‌طور که در شکل مشخص است مصرف توان راکتیو، ولتاژ شبکه را در نقطه PCC کاهش داده است. میزان THD جریان خروجی نیز در شکل (۴-۱۷) قابل مشاهده است. صفر نبودن میزان توان راکتیو همانند مورد قبل، باعث کاهش THD جریان خروجی شده است.



شکل (۴-۱۵) توان اکتیو (W) و توان راکتیو (Var) خروجی سامانه فتولتائیک به ازای اعمال ۲/۱- کیلووار به‌عنوان توان راکتیو مرجع به سیستم کنترل



شکل (۴-۱۶) ولتاژ شبکه در نقطه اتصال مشترک (V) و جریان خروجی سامانه فتوولتائیک ($10 \times A$) به ازای اعمال ۲/۱- کیلووار به‌عنوان توان راکتیو مرجع به سیستم کنترل



شکل (۴-۱۷) میزان هارمونیک‌های جریان خروجی سامانه فتوولتائیک هنگام مصرف ۲/۱ کیلووار توان راکتیو از شبکه

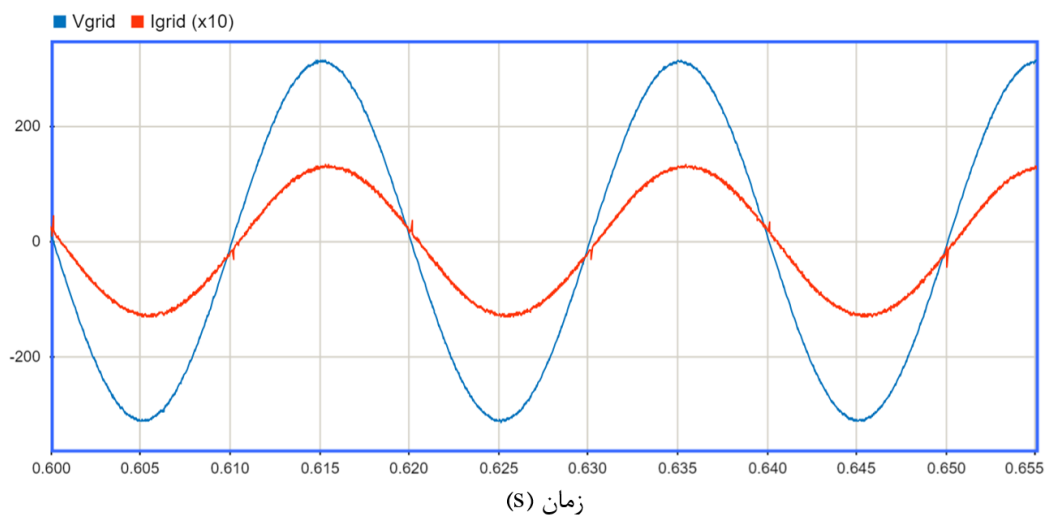
با توجه به نتایج شبیه‌سازی شده در این بخش، سامانه فتوولتائیک طراحی شده امکان تزریق و یا مصرف توان راکتیو را داراست. در صورتی که در شبکه مرکز کنترلی وجود داشته باشد تا شبکه را تحلیل کند، می‌تواند میزان توان راکتیو تزریقی یا مصرفی را به سامانه فتوولتائیک ارسال کند. اما در اکثر شبکه‌های توزیع این امکان وجود ندارد. استراتژی ارائه شده در بخش ۳-۸ می‌تواند بر اساس ولتاژ شبکه در نقطه PCC، میزان توان راکتیو مرجع برای جبران‌سازی ولتاژ شبکه را تعیین کند. در ادامه عملکرد این استراتژی در وضعیت افت ولتاژ، فلش ولتاژ و اضافه ولتاژ بررسی می‌شود.

۴-۴-۱ تزریق توان راکتیو در صورت وقوع افت ولتاژ و یا فلش ولتاژی

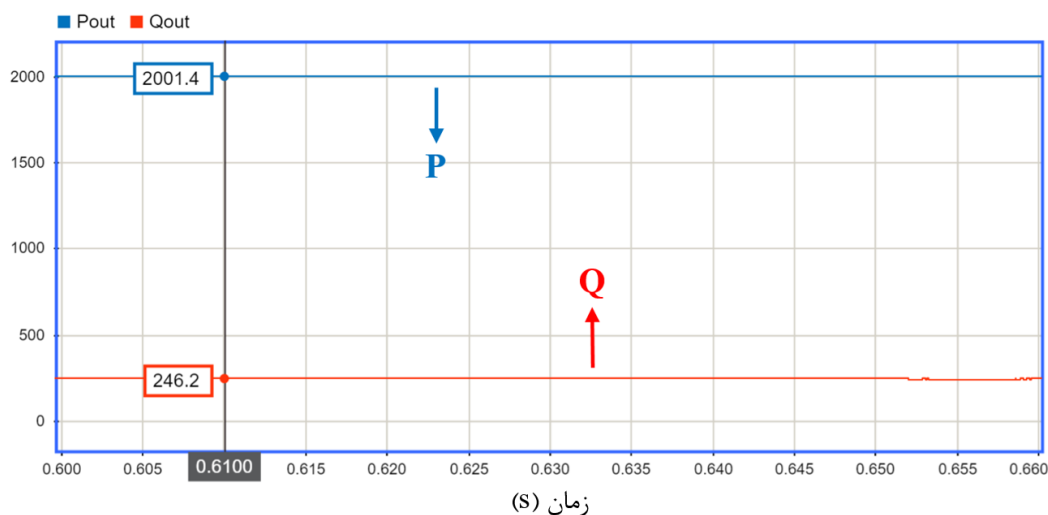
در شبیه‌سازی انجام شده، در وضعیت عادی شبکه به دلیل وجود سلف سری با منبع ولتاژ که بیانگر اتلاف توان در خطوط است، ولتاژ در نقطه PCC برابر با ۲۱۹ ولت می‌باشد. در صورتی که از الگوریتم پیشنهادی در بخش ۳-۸ استفاده شود، سامانه فتوولتائیک توان راکتیوی به میزان ۲۴۵ وار به شبکه تزریق می‌کند. شکل (۴-۱۸)-الف ولتاژ و جریان خروجی و شکل (۴-۱۸)-ب توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی سامانه را در حالت جبران‌سازی ولتاژ شبکه به کمک توان راکتیو نمایش می‌دهد. پس از جبران‌سازی، میزان ولتاژ در نقطه PCC به حدود ۲۲۰ ولت رسیده است. بنابراین توان راکتیو محاسبه شده توسط الگوریتم پیشنهادی، امکان جبران‌سازی ولتاژ در حالت عملکرد عادی شبکه را فراهم می‌کند.

با اضافه کردن بار سلفی به شبکه می‌توان فلش ولتاژ ایجاد کرد. در ابتدا باری برابر با ۱۵۰۰ وار به شبکه اضافه می‌شود. این بار باعث کاهش ولتاژ نقطه اتصال مشترک به ۲۱۵ ولت می‌شود. در این حالت سامانه فتوولتائیک برای جبران ولتاژ شروع به تزریق توان راکتیو می‌کند. میزان این توان توسط الگوریتم پیشنهادی در بخش ۳-۸ محاسبه و به سیستم کنترل ارسال می‌شود. شکل (۴-۱۹)-الف ولتاژ و جریان خروجی سامانه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نمایش داده شده است با اعمال بار، در ولتاژ نقطه PCC تغییری ایجاد نشده است. جریان تزریق شده به دلیل تزریق توان راکتیو افزایش یافته و

نسبت به ولتاژ پیش‌فاز شده است. شکل (۴-۱۹) - توان‌های خروجی سامانه را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل، با بروز فلش ولتاژ، سامانه توان راکتیوی در حدود ۱۴۷۰ وار به شبکه تزریق کرده است بدون اینکه توان اکتیو خروجی کاهش یابد. علت اینکه توان راکتیو تزریقی به شبکه قبل از بروز فلش ولتاژی صفر نیست، جبران‌سازی افت ولتاژی است که به دلیل در نظر گرفتن اتلاف خطوط در نظر گرفته شده است. بر اساس شکل (۴-۱۹)، پس از مدت‌زمانی کوتاه بار ۱/۵ کیلوواری از شبکه خارج شده و سامانه به وضعیت عادی خود برمی‌گردد.

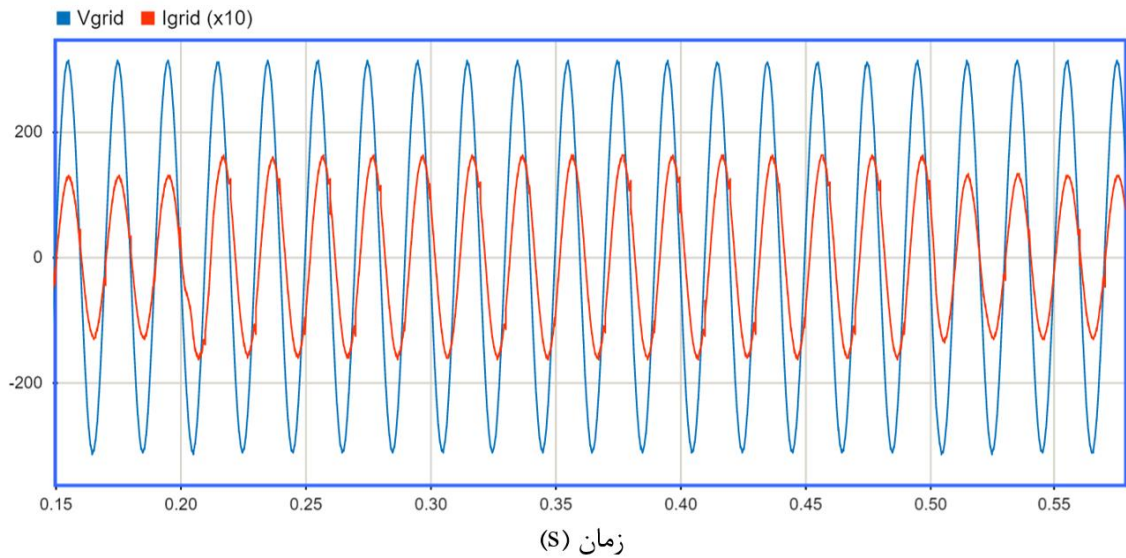


الف

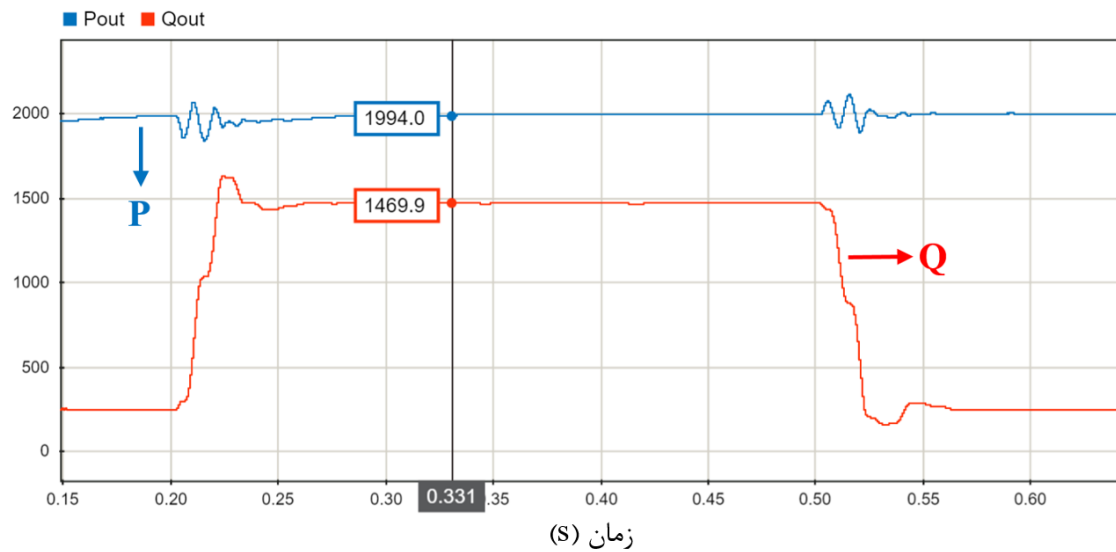


ب

شکل (۴-۱۸) خروجی سامانه فتوولتائیک در حالت عادی عملکردی پس از جبران‌سازی الف) ولتاژ PCC (V) و جریان خروجی (A×۱۰) ب) توان اکتیو (W) و توان راکتیو (Var) خروجی



الف

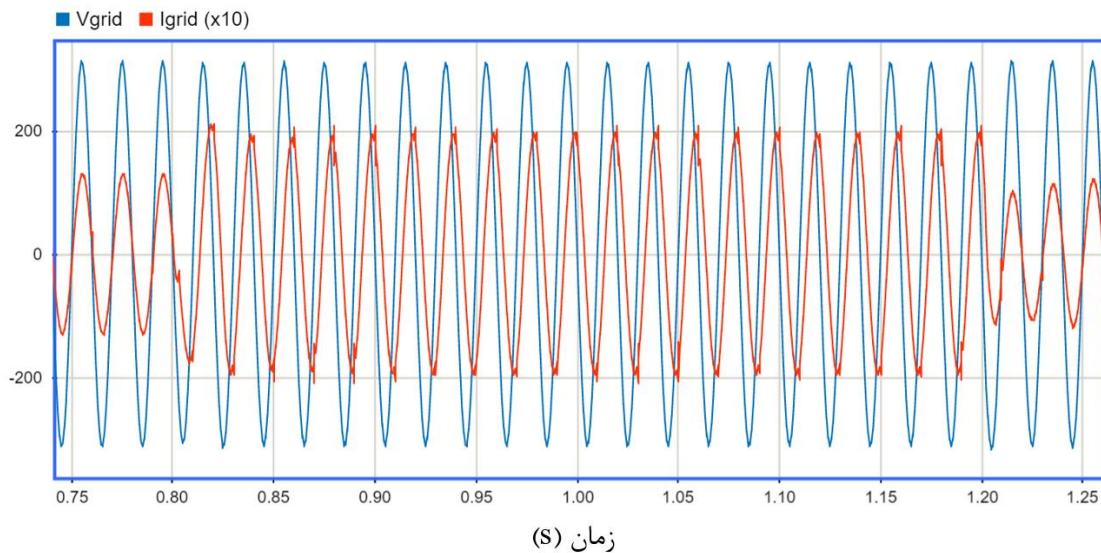


ب

شکل (۴-۱۹) خروجی سامانه فتوولتائیک در صورت بروز فلش ولتاژ با اضافه شدن بار ۱/۵ کیلوواری پس از جبران‌سازی (الف) ولتاژ PCC (V) و جریان خروجی ($10 \times A$) (ب) توان اکتیو (W) و توان راکتیو (Var) خروجی

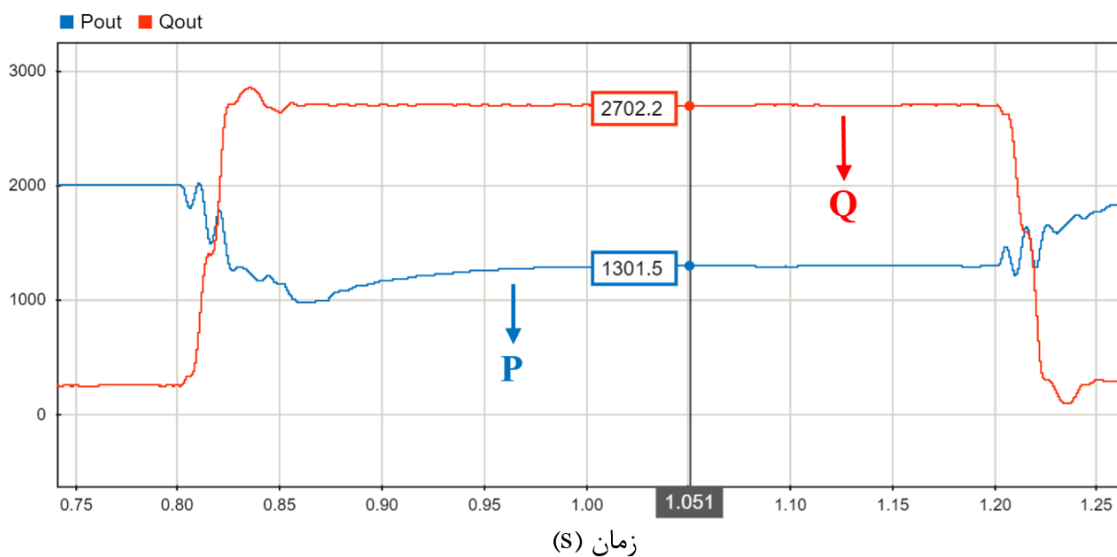
برای ایجاد فلش ولتاژ بیشتر نسبت به حالت قبل، یک بار سلفی ۳ کیلوواری به شبکه اضافه می‌گردد. این بار باعث ایجاد افتی ۴/۱ درصدی در ولتاژ می‌شود. شکل (۴-۲۰) خروجی سامانه را در صورت بروز این فلش ولتاژ نشان می‌دهد. در صورتی که سامانه بخواهد در توان نامی میزان توان راکتیو مرجع را به شبکه تزریق نماید، جریان عبوری از کلیدها از مقدار مجاز آن بیشتر می‌شود. بنابراین سامانه با کاهش

توان اکتیو خروجی سعی می‌کند تا تمرکز خود را بر روی جبران‌سازی ولتاژ شبکه معطوف نماید. همان‌طور که در شکل (۴-۲۰) مشخص است، سامانه توانسته است با تزریق توان راکتیو تا حدود زیادی ولتاژ شبکه را جبران نماید.



زمان (S)

الف

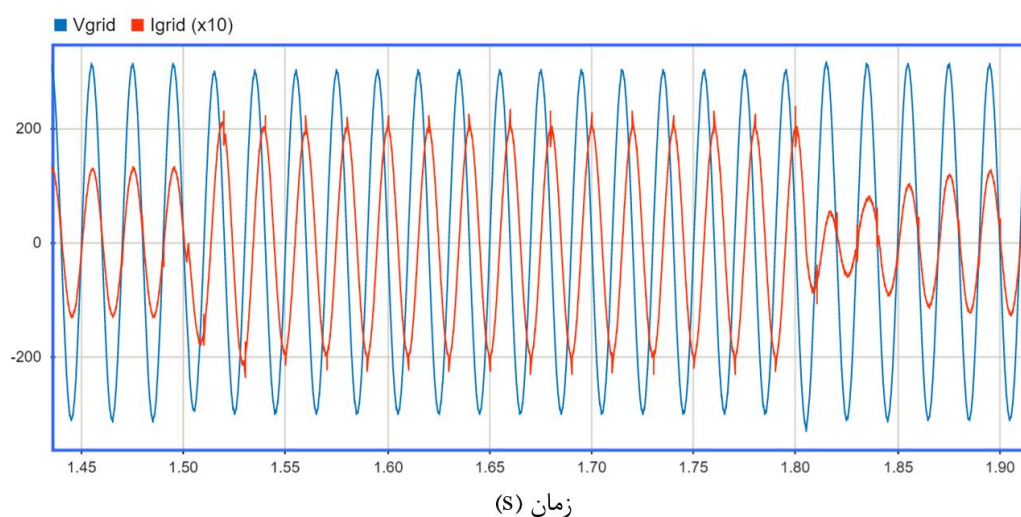


زمان (S)

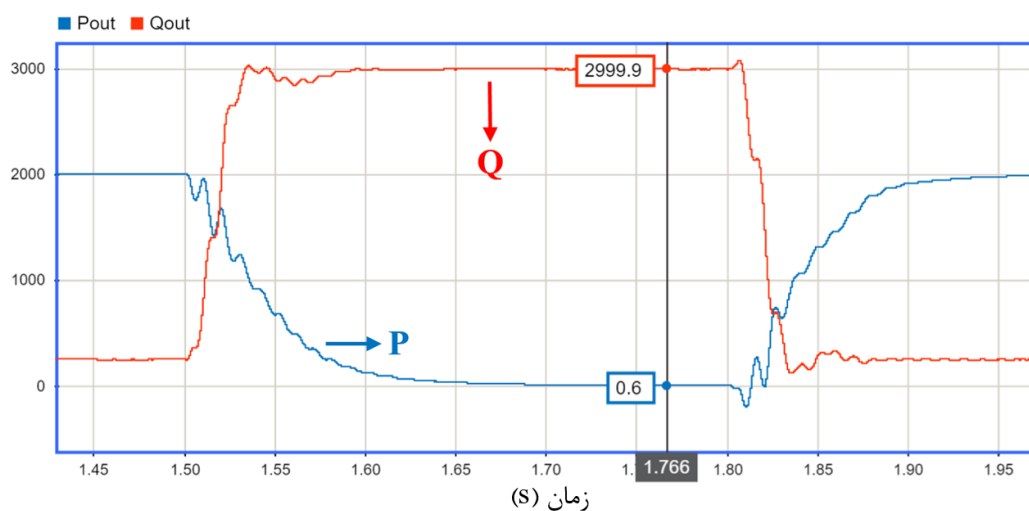
ب

شکل (۴-۲۰) خروجی سامانه فتوولتائیک در صورت بروز فلش ولتاژ با اضافه شدن بار ۳ کیلوواری پس از جبران‌سازی (الف) ولتاژ PCC (V) و جریان خروجی ($10 \times A$) (ب) توان اکتیو (W) و توان راکتیو (Var) خروجی

در آزمون بعد، یک بار ۶ کیلوواری به شبکه اضافه می‌شود که باعث افت ولتاژ ۷/۶ درصدی در نقطه PCC می‌گردد. شکل (۴-۲۱) خروجی سامانه را در این وضعیت نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نمایش داده شده است، سامانه برای جبران فلش ولتاژی ایجاد شده، حداکثر توان راکتیوی که قادر است کنترل نماید را به شبکه تزریق نموده است. برای رسیدن به این میزان توان راکتیو و جلوگیری از تجاوز جریان عبوری از کلیدها از حد مجاز، الگوریتم ارائه شده توان اکتیو را به صفر کاهش داده است.



الف



ب

شکل (۴-۲۱) خروجی سامانه فتوولتائیک در صورت بروز فلش ولتاژ با اضافه شدن بار ۶ کیلوواری پس از جبران‌سازی (الف) ولتاژ PCC (V) و جریان خروجی ($10 \times A$) (ب) توان اکتیو (W) و توان راکتیو (Var) خروجی

جدول (۴-۱) خروجی سامانه فتوولتائیک شامل ولتاژ در نقطه اتصال مشترک، جریان، توان اکتیو و توان راکتیو را در وضعیت‌های مختلفی که بررسی شد نمایش می‌دهد. داده‌های این جدول دو نکته اساسی را بیان می‌کند: نخست اینکه الگوریتم پیشنهادی توانسته است عملکردی قابل قبول در جبران ولتاژ شبکه داشته باشد و دوم، امکان کنترل توان راکتیو توسط سامانه‌های فتوولتائیک نصب شده در شبکه می‌تواند به پایداری شبکه در هنگام وقوع خطا کمک کند.

جدول (۴-۱) خروجی سامانه فتوولتائیک در صورت وقوع افت ولتاژ و یا فلش ولتاژی در شبکه

توان راکتیو (Var)	توان اکتیو (W)	جریان خروجی		ولتاژ PCC		وضعیت	شرایط
		THD (%)	مقدار (A)	THD (%)	مقدار (V)		
۰	۲۰۰۰	۱/۷۲	۹/۱	۰/۵۷	۲۱۹	عدم جبران‌سازی	عادی
۲۴۵	۲۰۰۰	۱/۶۵	۹/۱۶۴	۰/۵۶	۲۱۹/۹	جبران‌سازی	
۰	۲۰۰۰	۱/۷۲	۹/۱۹۳	۰/۶	۲۱۵	عدم جبران‌سازی	* بار ۱
۱۴۷۰	۲۰۰۰	۱/۳۵	۱۱/۳۱	۰/۵۹	۲۱۹/۵	جبران‌سازی	
۰	۲۰۰۰	۱/۶۷	۹/۴۴	۰/۵۹	۲۱۱	عدم جبران‌سازی	** بار ۲
۲۷۰۰	۱۳۰۰	۱/۲۷	۱۳/۷۳	۰/۶۶	۲۱۹/۱	جبران‌سازی	
۰	۲۰۰۰	۱/۵۹	۹/۷۵۲	۰/۶۱	۲۰۳/۴	عدم جبران‌سازی	*** بار ۳
۳۰۰۰	۰	۱/۲	۱۴/۱۸	۰/۶۸	۲۱۱/۵	جبران‌سازی	

* بار ۱/۵ کیلوواری برای ایجاد فلش ولتاژی به شبکه اضافه می‌شود.

** بار ۳ کیلوواری برای ایجاد فلش ولتاژی به شبکه اضافه می‌شود.

*** بار ۶ کیلوواری برای ایجاد فلش ولتاژی به شبکه اضافه می‌شود.

۴-۴-۲ تزریق توان راکتیو در صورت وقوع اضافه ولتاژ

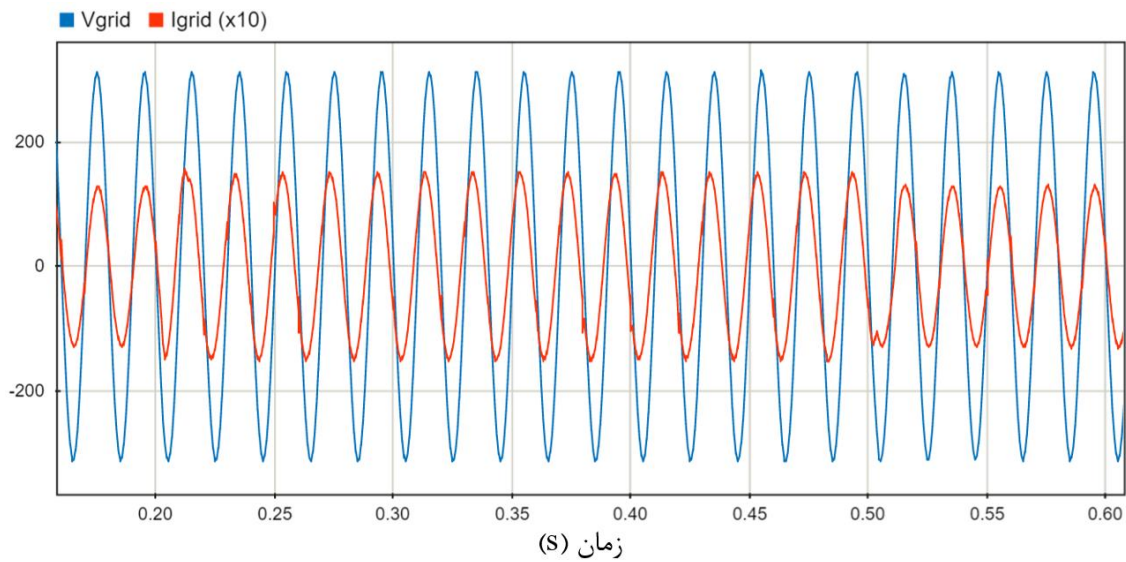
در بخش ۲-۶ بیان شد که تمرکز مولدهای پراکنده مانند سامانه‌های فتوولتائیک در یک محدوده، می‌تواند باعث ایجاد اضافه ولتاژ گردد. در صورتی که این اضافه ولتاژ مقطعی باشد، می‌توان بدون اینکه توان خروجی مولد(ها) را کاهش داد (بسته به مقدار اضافه ولتاژ)، با مصرف توان راکتیو به جبران‌سازی ولتاژ پرداخت. برای شبیه‌سازی وضعیت اضافه ولتاژ، میزان ولتاژ منبع افزایش می‌یابد. در ادامه به بررسی نتایج شبیه‌سازی پرداخته می‌شود.

شکل (۴-۲۲) خروجی سامانه فتوولتائیک را به ازای افزایش $\frac{2}{3}$ درصدی ولتاژ نشان می‌دهد. در این حالت سامانه با حفظ توان اکتیو نامی در خروجی، میزان $\frac{1}{2}$ کیلوواری توان راکتیو از شبکه مصرف کرده است. همان‌طور که در شکل (۴-۲۲)-الف قابل مشاهده است، در این وضعیت میزان جریان خروجی افزایش یافته و وضعیت آن نسبت به ولتاژ شبکه به پس‌فاز تغییر کرده است. با مصرف توان راکتیو از شبکه، ولتاژ در نقطه اتصال مشترک به حدود ۲۲۰ ولت کاهش یافته است.

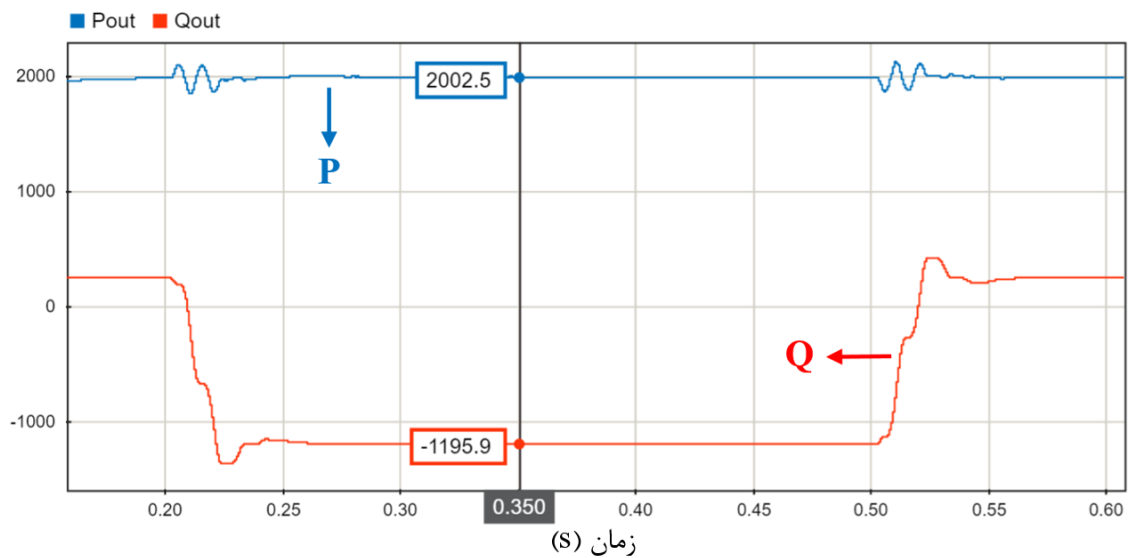
شکل (۴-۲۳)-الف ولتاژ و جریان خروجی سامانه را به ازای افزایش $\frac{4}{6}$ درصدی ولتاژ در نقطه PCC نشان می‌دهد. جریان خروجی در این وضعیت نسبت به حالت قبل افزایش یافته و پس‌فازتر شده است. شکل (۴-۲۳)-ب توان‌های خروجی سامانه را نمایش می‌دهد. در این حالت برای افزایش نقش جبران‌سازی سامانه، میزان توان اکتیو کاهش یافته است تا سامانه قادر باشد مقدار بیشتری توان راکتیو از شبکه مصرف کند. در این حالت نیز سامانه توانسته است تا حدود زیادی اضافه ولتاژ شبکه را خنثی نماید و ولتاژ را به حدود ۲۲۰ ولت برساند.

در شکل (۴-۲۴) میزان ولتاژ به میزان ۱۰ درصد مقدار نامی افزایش یافته است. در این وضعیت برای حداکثر جبران‌سازی، سامانه توان اکتیوی به شبکه تزریق نمی‌کند و تمامی ظرفیت آن به مصرف توان راکتیو اختصاص یافته است. شکل (۴-۲۴)-الف وضعیت ولتاژ و جریان خروجی سامانه را در این

حالت نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است فاز جریان نسبت به ولتاژ، ۹۰ درجه پس‌فاز است. در این حالت سامانه با مصرف توان راکتیو توانسته است حدود ۵ درصد از اضافه ولتاژ بکاهد.

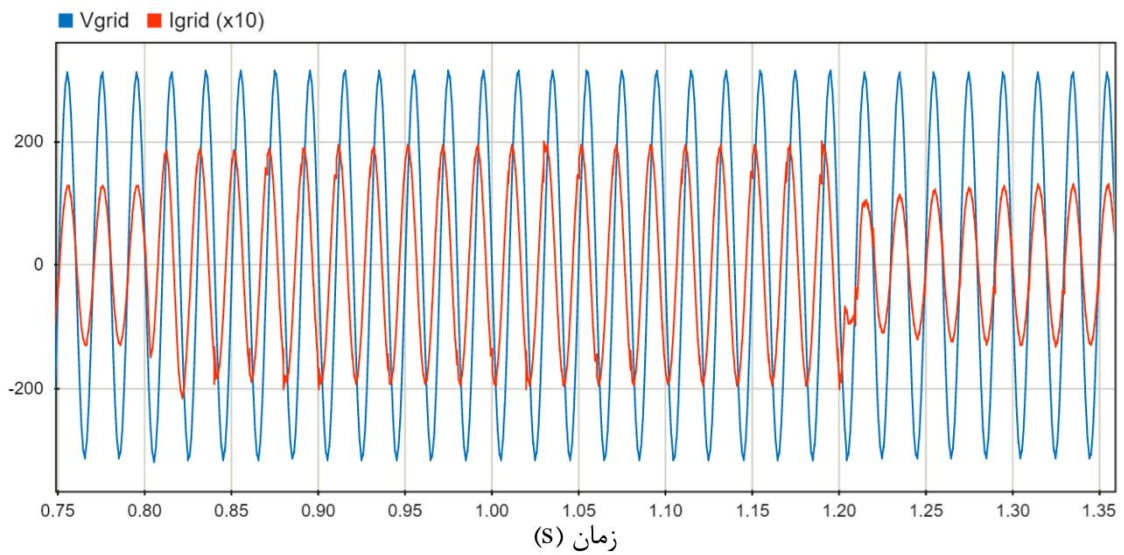


الف

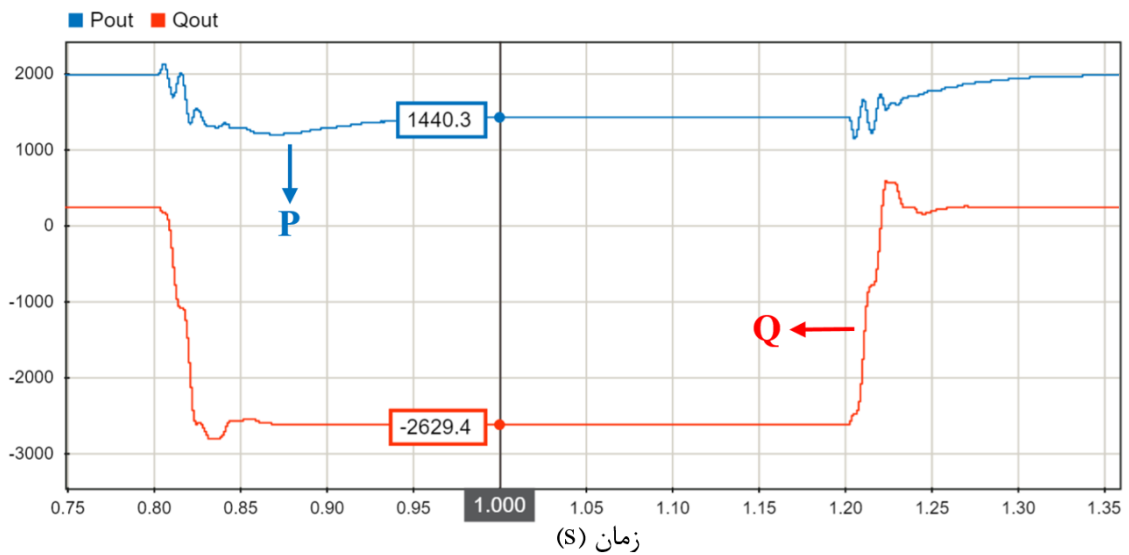


ب

شکل (۴-۲۲) خروجی سامانه فتوولتائیک در صورت بروز اضافه ولتاژ ۲/۳ درصدی پس از جبران‌سازی الف) ولتاژ PCC (V) و جریان خروجی (A×۱۰) ب) توان اکتیو (W) و توان راکتیو (Var) خروجی

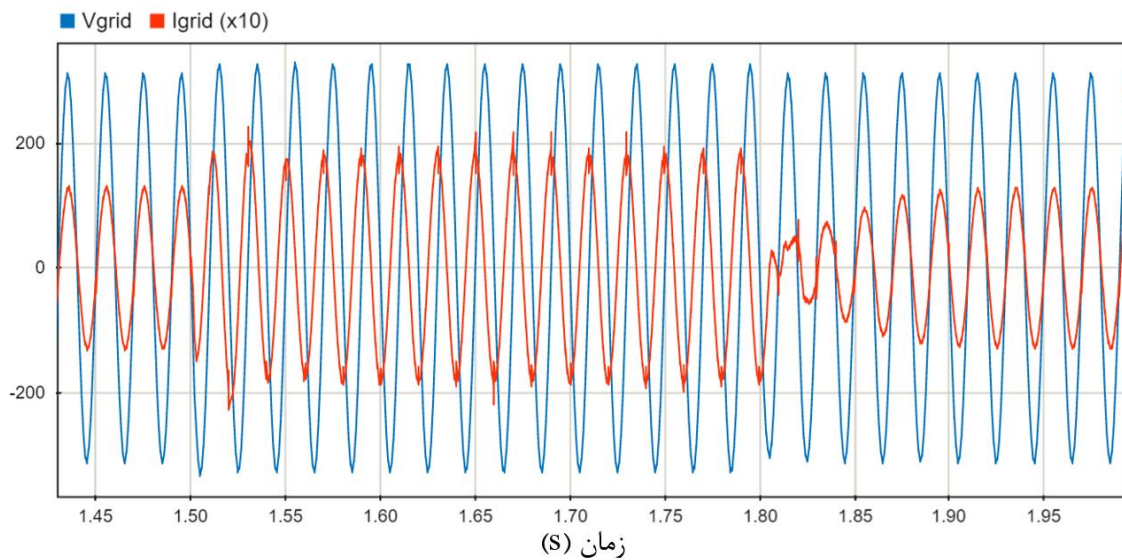


الف

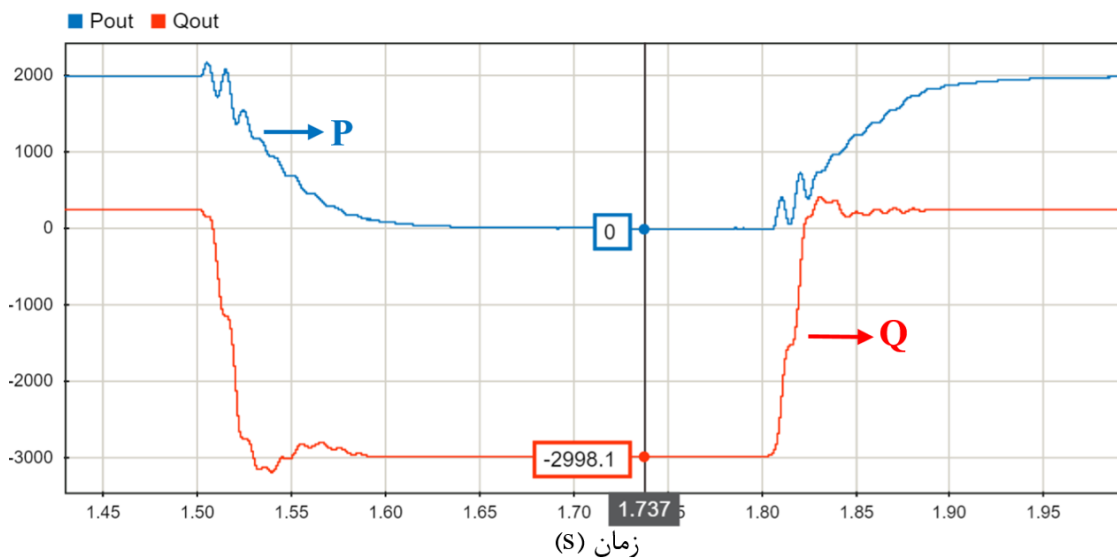


ب

شکل (۴-۲۳) خروجی سامانه فتوولتائیک در صورت بروز اضافه ولتاژ ۴/۶ درصدی پس از جبران سازی الف) ولتاژ PCC (V) و جریان خروجی ($10 \times A$) ب) توان اکتیو (W) و توان راکتیو (Var) خروجی



الف



ب

شکل (۴-۲۴) خروجی سامانه فتوولتائیک در صورت بروز اضافه ولتاژ ۱۰ درصدی پس از جبران‌سازی الف) ولتاژ PCC (V) و جریان خروجی ($10 \times A$) ب) توان اکتیو (W) و توان راکتیو (Var) خروجی

جدول (۲-۴) خروجی سامانه فتوولتائیک شامل ولتاژ در نقطه اتصال مشترک، جریان، توان اکتیو و توان راکتیو را در وضعیت‌های مختلفی که بررسی شد نمایش می‌دهد. بر اساس این جدول، سامانه فتوولتائیک با مصرف توان راکتیو در هنگام وقوع اضافه ولتاژ می‌تواند به جبران‌سازی ولتاژ شبکه بپردازد.

جدول (۲-۴) خروجی سامانه فتوولتائیک در صورت وقوع اضافه ولتاژ در شبکه

توان راکتیو (Var)	توان اکتیو (W)	جریان خروجی		ولتاژ PCC		وضعیت	اضافه ولتاژ
		THD (%)	مقدار (A)	THD (%)	مقدار (V)		
۰	۲۰۰۰	۱/۷۸	۸/۲۹۱	۰/۵۶	۲۲۴/۱	عدم جبران‌سازی	۲/۳ درصد
-۱۲۰۰	۲۰۰۰	۱/۶۶	۱۰/۵۶	۰/۵۷	۲۲۰/۱	جبران‌سازی	
۰	۲۰۰۰	۱/۷۵	۸/۶۷	۰/۵	۲۲۹/۲	عدم جبران‌سازی	۴/۶ درصد
-۲۲۳۰	۱۴۴۰	۱/۳۷	۱۳/۵۳	۰/۶۵	۲۲۰/۸	جبران‌سازی	
۰	۲۰۰۰	۱/۷۴	۸/۴۴	۰/۴۱	۲۴۰	عدم جبران‌سازی	۱۰ درصد
-۳۰۰۰	۰	۱/۴۶	۱۳	۰/۶۴	۲۳۰/۶	جبران‌سازی	

۴-۵ جمع‌بندی

سامانه فتوولتائیکی که در فصل ۳ طراحی شد، در این فصل مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا عملکرد برخی از اجزای سامانه مورد بررسی قرار گرفت. سپس عملکرد سامانه هنگامی که فقط توان اکتیو به شبکه تزریق می‌کند بررسی شد. همچنین عملکرد سامانه هنگام تغییر میزان تابش خورشید و دمای محیط مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه فصل عملکرد سامانه فتوولتائیک در کنترل توان راکتیو بررسی شد و در نهایت صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای تعیین توان راکتیو مرجع که در بخش ۳-۸ ارائه شد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سامانه فتوولتائیک طراحی شده نشان می‌دهد که این سامانه توانسته است به کلیه اهدافی که برای آن تعریف شده است دست یابد.



فصل ۵

نتیجه گیری و پیشنهادات



۱-۵ نتیجه گیری

در این پایان نامه یک سامانه فتوولتائیک تک فاز و متصل به شبکه که توانایی کنترل توان راکتیو را دارد، طراحی و شبیه سازی شد. نخستین معیاری که در طراحی سامانه مدنظر قرار گرفت، تبعیت آن از قوانین شبکه است؛ در قوانین شبکه ایران، ملاک اتصال سامانه فتوولتائیک به شبکه پیاده سازی استاندارد ۱۱۸۵۹ ملی است.

شروع طراحی سامانه فتوولتائیک، انتخاب توان خروجی پنل های خورشیدی است. در این پایان نامه به جای استفاده از یک مقدار فرضی برای توان سامانه، سعی شده است این مقدار بر اساس ملاک هایی که در عمل برای طراحی یک سامانه فتوولتائیک مسکونی مورد استفاده قرار می گیرد، انتخاب شود. سپس بر اساس این توان خروجی و مشخصات شبکه، پارامترهای سامانه تعیین گردد.

در مرحله بعد، سیستم کنترل سامانه با سه هدف مهم طراحی شد: نخست امکان انجام وظیفه اصلی یعنی تزریق حداکثری توان اکتیو به شبکه؛ دوم عملکرد بهینه سیستم کنترل و سوم کنترل توان راکتیو. سامانه فتوولتائیک قبل از اینکه به عنوان کنترل کننده توان راکتیو استفاده شود می بایست عملکرد اصلی خود تحت عنوان یک مولد توان را به خوبی انجام دهد. برای این کار سیستم کنترل با استفاده از روش های پیشنهادی به گونه ای طراحی شد تا علاوه بر تزریق حداکثری توان اکتیو به شبکه و کنترل توان راکتیو، در زمینه محاسبات نیز بهینه عمل کند. سپس بر پایه استراتژی هایی مختلفی که برای کنترل توان راکتیو ارائه شده است یک روش پیشنهادی با توجه به سیستم کنترل طراحی شده پیشنهاد گردید. این استراتژی پیشنهادی قادر است توان های اکتیو و راکتیو مرجع را در هر سه وضعیت وقوع فلش ولتاژ، اضافه ولتاژ مقطعی و افت ولتاژی که در شرایط عادی شبکه وجود دارد تخمین بزند.

سامانه فتوولتائیک طراحی شده در برنامه Simulink نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده و نتایج مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که اینورتر HERIC استفاده شده در سامانه فتوولتائیک به همراه روش کلیدزنی تک قطبی توانسته است قابلیت کنترل توان راکتیو را به این سامانه

اضافه کند. همچنین استراتژی پیشنهادی برای کنترل توان راکتیو به خوبی توانسته میزان توان‌های اکتیو و راکتیو مرجع را در هنگام وقوع فلش ولتاژ تخمین بزند. در مراجعی که استراتژی‌هایی برای کنترل توان راکتیو ارائه شده‌اند، دو مقوله جبران‌سازی ولتاژ شبکه در هنگام اضافه ولتاژ و یا در شرایط کار عادی شبکه مورد بررسی قرار نگرفته‌اند ولی نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سامانه فتوولتائیک طراحی شده به همراه استراتژی کنترل توان راکتیو پیشنهادی، قادر است افت ولتاژ شرایط عادی شبکه و یا اضافه ولتاژهای مقطعی را نیز جبران‌سازی نماید. بنابراین سامانه فتوولتائیک طراحی شده قادر است علاوه بر تزریق توان اکتیو به شبکه، ولتاژ شبکه در نقطه اتصال مشترک را نیز در تمامی شرایط جبران‌سازی نموده و به پایداری شبکه کمک کند.

۲-۵ پیشنهادها

- ارزیابی عملکرد سامانه فتوولتائیک در کنترل توان راکتیو در حضور چند سامانه دیگر: در صورتی که سامانه‌های فتوولتائیک دیگری با توانایی کنترل توان راکتیو در شبکه موجود باشند، نحوه تأثیرگذاری آن‌ها بر پارامترهای شبکه در هنگام وقوع خطا مورد ارزیابی قرار گیرد.
- تعمیم استراتژی کنترل توان راکتیو به سامانه‌های سه فاز: در این پایان‌نامه استراتژی پیشنهادی برای یک سامانه تک‌فاز مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد این استراتژی می‌تواند در سامانه‌های سه فاز نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.
- بررسی سامانه فتوولتائیک طراحی شده و استراتژی توان راکتیو ارائه شده در ساختار یک طبقه: معمولاً سامانه‌های فتوولتائیکی که برای کاربردهای مسکونی استفاده می‌شوند توان نامی پایینی دارند. از این رو برای رسیدن ولتاژ لینک DC به مقدار مجاز، نیازمند مبدل بوست هستند. در توان‌های بالاتر که ولتاژ خروجی مجموعه پنل‌های خورشیدی بالاتر از

دامنه ولتاژ شبکه است، می‌توان خروجی این پنل‌ها را به صورت مستقیم و بدون حضور مبدل DC/DC به عنوان ورودی اینورتر استفاده کرد. این نوع پیکربندی سامانه فتوولتائیک، ساختار یک طبقه را تشکیل می‌دهد.

مراجع

- [1] T. K. S. Freddy, J.-H. Lee, H.-C. Moon, K.-B. Lee, and N. A. Rahim, "Modulation Technique for Single-Phase Transformerless Photovoltaic Inverters with Reactive Power Capability," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017.
- [2] IEA-PVPS. (2017). *Snapshot of Global PV Markets 2016*. Available: <http://www.iea-pvps.org/>
- [3] EIA. (2017). *Solar Photovoltaic Cell/Module Shipments Report*. Available: https://www.eia.gov/renewable/annual/solar_photo/
- [4] A. McEvoy, T. Markvart, L. Castañer, T. Markvart, and L. Castaner, *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications*. Elsevier, 2003.
- [5] ساتبا. (۱۳۹۶). پتانسیل تابش و نقشه تابش خورشید در ایران. آدرس اینترنتی: <http://www.satba.gov.ir/>
- [6] استاندارد ۱۱۸۵۹ ملی ایران: سامانه های فتوولتائیک (PV) - ویژگی های اتصال به شبکه، ۱۳۸۸.
- [7] D. G. F. Sonnenenergie, *Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects and engineers*. Earthscan, 2007.
- [8] M. Aarre Maehlum. (2017). *Which Solar Panel Type is Best? Mono- vs. Polycrystalline vs. Thin Film*. Available: <http://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film/>
- [9] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, *Power electronics and control techniques for maximum energy harvesting in photovoltaic systems*. CRC press, 2012.
- [10] M. Calais, J. Myrzik, T. Spooner, and V. G. Agelidis, "Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems-an overview," in *Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual*, 2002, vol. 4, pp. 1995-2000: IEEE.
- [11] B. Liu, S. Duan, and T. Cai, "Photovoltaic DC-building-module-based BIPV system—Concept and design considerations," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 5, pp. 1418-1429, 2011.
- [12] M. Meinhardt and G. Cramer, "Past, present and future of grid connected photovoltaic-and hybrid-power-systems," in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*, 2000, vol. 2, pp. 1283-1288: IEEE.
- [13] D. W. Hart, *Power electronics*. Tata McGraw-Hill Education, 2011.
- [14] H. Hu, S. Harb, N. Kutkut, I. Batarseh, and Z. J. Shen, "A review of power decoupling techniques for microinverters with three different decoupling capacitor locations in PV systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 6, pp. 2711-2726, 2013.

- [15] D. Barater, E. Lorenzani, C. Concari, G. Franceschini, and G. Buticchi, "Recent advances in single-phase transformerless photovoltaic inverters," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 2, pp. 260-273, 2016.
- [16] D. Meneses, F. Blaabjerg, O. Garcia, and J. A. Cobos, "Review and comparison of step-up transformerless topologies for photovoltaic AC-module application," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 6, pp. 2649-2663, 2013.
- [17] Q. Li and P. Wolfs, "A review of the single phase photovoltaic module integrated converter topologies with three different DC link configurations," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 1320-1333, 2008.
- [18] X. Zong, "A single phase grid connected DC/AC inverter with reactive power control for residential PV application," Master of Applied Science thesis, Graduate Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, 2011.
- [19] B. Yang, W. Li, Y. Gu, W. Cui, and X. He, "Improved transformerless inverter with common-mode leakage current elimination for a photovoltaic grid-connected power system," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 27, no. 2, pp. 752-762, 2012.
- [20] H. Xiao and S. Xie, "Leakage current analytical model and application in single-phase transformerless photovoltaic grid-connected inverter," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 52, no. 4, pp. 902-913, 2010.
- [21] T. K. S. Freddy, N. A. Rahim, W.-P. Hew, and H. S. Che, "Comparison and analysis of single-phase transformerless grid-connected PV inverters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 10, pp. 5358-5369, 2014.
- [22] س. متداولی و ع. دستفان، "بررسی عملکرد ساختارهای متفاوت اینورتر در سامانه فتوولتائیک تکفاز متصل به شبکه"، ششمین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران، تبریز، ۱۳۹۶.
- [23] T.-F. Wu, C.-L. Kuo, K.-H. Sun, and H.-C. Hsieh, "Combined unipolar and bipolar PWM for current distortion improvement during power compensation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 4, pp. 1702-1709, 2014.
- [24] S. E. Babaa, M. Armstrong, and V. Pickert, "Overview of maximum power point tracking control methods for PV systems," *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 2, no. 08, p. 59, 2014.
- [25] M. A. De Brito, L. P. Sampaio, G. Luigi, G. A. e Melo, and C. A. Canesin, "Comparative analysis of MPPT techniques for PV applications," in *Clean Electrical Power (ICCEP), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 99-104: IEEE.
- [26] Z. Zeng, H. Yang, R. Zhao, and C. Cheng, "Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 223-270, 2013.
- [27] X. Yuan, W. Merk, H. Stemmler, and J. Allmeling, "Stationary-frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady-state error

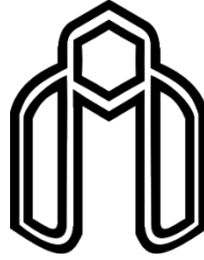
- for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operating conditions," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 38, no. 2, pp. 523-532, 2002.
- [28] L. Amuda, B. Cardoso Filho, S. Silva, S. Silva, and A. Diniz, "Wide bandwidth single and three-phase PLL structures for grid-tied PV systems," in *Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE, 2000*, pp. 1660-1663: IEEE.
- [29] Q.-C. Zhong and T. Hornik, *Control of power inverters in renewable energy and smart grid integration*. John Wiley & Sons, 2012.
- [30] M. Jang, M. Ciobotaru, and V. G. Agelidis, "A single-phase grid-connected fuel cell system based on a boost-inverter," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 28, no. 1, pp. 279-288, 2013.
- [31] A. Reznik, M. G. Simoes, A. Al-Durra, and S. Mueeen, "LCL filter design and performance analysis for grid-interconnected systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 2, pp. 1225-1232, 2014.
- [32] A. Cagnano, E. De Tuglie, M. Liserre, and R. A. Mastromauro, "Online optimal reactive power control strategy of PV inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 10, pp. 4549-4558, 2011.
- [33] J. D. Jason Lai, Bin Gu, Nathan Kees, Ben York, Wensong Yu, Jeff Smith, Tom Key, Chris Trueblood, Mack Grady, "HIGH-PENETRATION PV MODELING, MONITORING, AND ANALYSIS WITH ADVANCED POWER ELECTRONICS," 2013.
- [34] Y. Yang, F. Blaabjerg, and H. Wang, "Low-voltage ride-through of single-phase transformerless photovoltaic inverters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 3, pp. 1942-1952, 2014.
- [35] A. Momeneh, M. Castilla, J. Miret, P. Martí, and M. Velasco, "Comparative study of reactive power control methods for photovoltaic inverters in low-voltage grids," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 3, pp. 310-318, 2016.
- [36] A. Spring, G. Wirth, G. Becker, R. Pardatscher, and R. Witzmann, "Grid Influences From Reactive Power Flow of Photovoltaic Inverters With a Power Factor Specification of One," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1222-1229, 2016.
- [37] S. Weckx and J. Driesen, "Optimal Local Reactive Power Control by PV Inverters," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1624-1633, 2016.
- [38] E. E. Pompodakis, I. A. Drougakis, I. S. Lelis, and M. C. Alexiadis, "Photovoltaic systems in low-voltage networks and overvoltage correction with reactive power control," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 3, pp. 410-417, 2016.
- [39] Y. Yang, H. Wang, and F. Blaabjerg, "Reactive power injection strategies for single-phase photovoltaic systems considering grid requirements," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 6, pp. 4065-4076, 2014.
- [40] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1398-1409, 2006.

- [41] S. Peng, A. Luo, Z. Lv, J. Wu, and L. Yu, "Power control for single-phase microgrid based on the PQ theory," in *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference on*, 2011, pp. 1274-1277: IEEE.
- [42] C. Y. Wu, C. H. Chen, J. W. Cao, and M. T. Liu, "Power control and pulsation decoupling in a single-phase grid-connected voltage-source inverter," in *TENCON Spring Conference, 2013 IEEE*, 2013, pp. 475-479: IEEE.
- [43] C.-H. Chang, Y.-H. Lin, Y.-M. Chen, and Y.-R. Chang, "Simplified reactive power control for single-phase grid-connected photovoltaic inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 5, pp. 2286-2296, 2014.

Abstract

This thesis presents a single-phase grid-connected photovoltaic (PV) system with reactive power control for residential applications. In order to design this system, these subjects have been considered: inverter and its switching method, controller system and reactive power control strategy. The inverter used in this system is HERIC (Highly Efficient and Reliable Inverter Concept) with unipolar switching method, which offers a better performance than the typical full-bridge structure. The PV controller system is designed to provide reactive power control with optimal system performance. Since this photovoltaic system can control reactive power, a strategy is proposed to control grid voltage during faults. Finally, the accuracy of the designed system performance is demonstrated by simulation in MATLAB Simulink. The simulation results show that the designed photovoltaic system, along with the reactive power control strategy, can provide grid voltage compensation during faults, in addition to injecting the active power to the grid.

Keywords: Photovoltaic System, PV System, Reactive Power, Reactive power control in PV system, PV design



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical Engineering and Robotic
M.Sc. Thesis in Power Electronic and Machine Engineering

**Reactive Power Control for Single-Phase
Grid-Connected Photovoltaic System**

Saeed Motedaveli Roodi

Supervisor:
Dr. Ali Dastfan

2018