

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد

## کنترل یک واحد تولید توان خورشیدی در برابر فروافتادگی ولتاژ در شبکه توزیع

ارشاد راهی

استاد راهنما:

آقای دکتر امین حاجی زاده

دی ۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مهندسی برق و رباتیک

گروه : قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای ارشاد راهی

تحت عنوان: کنترل یک واحد تولید توان خورشیدی در برابر فروافتادگی ولتاژ در شبکه

توزیع

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید راهنما
	آقای دکتر امین حاجی زاده

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	آقای دکتر مرتضی رحیمیان		آقای دکتر علی دستفان
			آقای دکتر حسین قلی زاده نرم

تقدیم به خانواده خوبم

با تشکر از استاد عزیزم جناب دکتر امین حاجی زاده  
به امید به یاد ماندن "درس آخر"، و ادامه استفاده از وجود ایشان

## تعهد نامه

اینجانب ارشاد راهی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق- ماشین و الکترونیک قدرت دانشکده برق و رباتیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه کنترل یک واحد تولید توان خورشیدی

در برابر فروافتادگی ولتاژ در شبکه توزیع تحت راهنمایی دکتر امین حاجی زاده متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای 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 بافتهای 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 افزار ها 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

گسترش سریع استفاده از منابع انرژی‌های تجدید پذیر در تولید پراکنده انرژی الکتریکی که در رأس آن سیستم تولید فتوولتاییک قرار دارد، چالش‌های کیفیت توانی، قابلیت اطمینان و پایداری را در بحث اتصال به شبکه این منابع آشکارتر کرده است. یکی از این مسائل، بررسی و کنترل پارامترهای میکرو گرید در شرایط وقوع خطا در شبکه سراسری است. در این پایان نامه کنترل سیستم‌های فتوولتاییک متصل به شبکه در شرایط خطا مورد بررسی قرار گرفته است. عملیات جبران هارمونیک‌ها و بررسی تاثیر افتادگی ولتاژ شبکه و کنترل کیفیت توان در این مدل انجام شده است. الگوریتم کنترلی مورد استفاده در این جبران ساز موازی بر اساس تئوری تکمیلی توان لحظه‌ای پایه ریزی شده است. الگوریتم جبران سازی جبران کننده اکتیو موازی باعث حذف مولفه‌های جریان‌های ناخواسته می‌شود. استفاده از سیستم جبران ساز موازی به همراه نیروگاه خورشیدی می‌تواند علاوه بر رساندن توان تولیدی نیروگاه خورشیدی به شبکه و بار، اعوجاج‌های جریان بار غیرخطی را جبران کند. این سیستم نسبت به نیروگاه خورشیدی و جبران ساز جداگانه به دلیل استفاده از یک اینورتر کمتر دارای مزیت اقتصادی نیز می‌باشد. یک الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان هیبرید در این پایان نامه پیشنهاد شده است. این الگوریتم، برپایه تخمین جریان حداکثر توان و همچنین استفاده از حلقه تنظیم دقیق با استفاده از روش P&O در سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه با موفقیت شبیه سازی شده است و نتایج شبیه سازی نشان دهنده عملکرد خوب این سیستم می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** نیروگاه فتوولتاییک، افت ولتاژ، ردیابی حداکثر توان، کیفیت توان

## فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه
۷	فصل دوم: مروری بر پیشینه تحقیق
۸	مقدمه ۱-۲
۹	اینورترهای سری و موازی ۲-۲
۱۹	فصل سوم: مدلها و تئوریهای تحقیق
۲۰	مقدمه ۱-۳
۲۰	نیروگاه های خورشیدی ۲-۳
۲۰	مدل سازی پنل خورشیدی ۱-۲-۳
۲۴	مهندسی سیستم فتوولتائیک ۲-۲-۳
۲۵	انواع سیستم های فتوولتائیک ۳-۲-۳
۲۸	مزایا و معایب سیستم های فتوولتائیک ۴-۲-۳
۲۹	تئوری پیشرفته توان لحظهای ۳-۳
۳۹	فصل چهارم: الگوریتمهای کنترلی سیستم فتوولتائیک
۴۰	مقدمه ۱-۴
۴۰	جبران ساز موازی ۲-۴
۴۲	جبران ساز موازی ۱-۲-۴
۴۴	ردیابی حداکثر توان ۳-۴
۴۷	کنترل ولتاژ باس DC ۴-۴
۵۱	فصل پنجم: شبیه سازی واحد فتوولتائیک متصل به شبکه و سیستم کنترلی آن
۵۲	مقدمه ۱-۵
۵۲	شبیه سازی واحد تولید توان خورشیدی متصل به شبکه ۲-۵
۵۴	شبیه سازی و بررسی سیستم MPPT ۱-۲-۵
۵۵	شبیه سازی و بررسی واحد تولید توان خورشیدی بدون کاربرد جبران ساز موازی ۲-۲-۵
۵۶	بررسی سیستم در شرایط نرمال شبکه با اعمال بار خطی ۳-۲-۵
۵۷	بررسی سیستم در شرایط نرمال شبکه با اعمال بار غیرخطی ۴-۲-۵
۵۹	بررسی سیستم در شرایط خطای شبکه با اعمال بار خطی ۵-۲-۵
۶۱	بررسی سیستم در شرایط خطای شبکه با اعمال بار غیر خطی ۶-۲-۵



۶۳	شبیه سازی و بررسی واحد تولید توان خورشیدی با عملکرد جبران ساز موازی	۳-۵
۶۴	عملکرد سیستم با کارکرد جبران سازها در شرایط نرمال شبکه	۱-۳-۵
۶۶	عملکرد سیستم در شرایط خطا	۲-۳-۵

۷۱ فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادات

۷۵ فصل هفتم : منابع

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۳): مدار معادل پنل خورشیدی ..... ۲۱
- شکل (۲-۳): اثر تغییرات شدت نور و دما در برای منحنی‌های  $I-V$  و  $P-V$ ، (a) تأثیر دما، (b) تأثیر شدت نور ..... ۲۴
- شکل (۳-۳): توان تبدلی در یک سیستم سه فاز سه سیمه ..... ۳۳
- شکل (۱-۴): میکروگرید متصل به شبکه با اعمال جبران ساز موازی در حضور بار غیر خطی ..... ۴۱
- شکل (۲-۴): الگوریتم جبران سازی پیشنهادی بر مبنای A-GTIP ..... ۴۴
- شکل (۳-۴): الگوریتم کلی دنبال کردن نقطه حداکثر توان ..... ۴۶
- شکل (۴-۴): شماتیک شارش توان در سیستم ..... ۴۷
- شکل (۵-۴): الگوریتم کلی کنترل ولتاژ باس DC ..... ۴۸
- شکل (۱-۵): مدل سیستم فتوولتاییک و اتصال آن به سیستم میکرو گرید ..... ۵۳
- شکل (۲-۵): توان نیروگاه خورشیدی ( $P_{PV}$ )، ولتاژ باس DC ( $V_{DC \text{ link}}$ )، ولتاژ پنل خورشیدی ( $V_{PV}$ ) (الف) روش [۱۴] (ب) روش ارائه شده ..... ۵۵
- شکل (۳-۵): شکل موج ولتاژ سیستم با اعمال بار خطی در شرایط نرمال شبکه (الف) ولتاژ بار، (ب) ولتاژ باس DC ..... ۵۶
- شکل (۴-۵): انتقال توان در حالت نرمال شبکه در حضور بار خطی ..... ۵۷
- شکل (۵-۵): شکل موج ولتاژهای شبکه در حالت نرمال با اعمال بار غیرخطی (a) ولتاژ بار غیر خطی، (b) ولتاژ باس DC ..... ۵۸
- شکل (۶-۵): تحلیل FFT برای شکل موج ولتاژ شبکه با اعمال بار غیر خطی ..... ۵۸
- شکل (۷-۵): شکل موجهای جریان شبکه در حالت نرمال با اعمال بار غیرخطی (الف) جریان شبکه،

- ب) جریان خروجی اینورتر، ج) جریان بار غیر خطی ..... ۵۹
- شکل (۵-۸): ولتاژهای سیستم در شرایط افتادگی ولتاژ شبکه با اعمال بار خطی الف) ولتاژ بار  
خطی، ب) ولتاژ باس DC ..... ۶۰
- شکل (۵-۹): وضعیت توان در شرایط افت ولتاژ و اعمال بار خطی ..... ۶۱
- شکل (۵-۱۰): ولتاژها در شرایط افت ولتاژ شبکه الف) ولتاژ بار غیر خطی، ب) ولتاژ باس DC ..... ۶۱
- شکل (۵-۱۱): جریانها در شرایط افت ولتاژ شبکه الف) جریان بار غیر خطی، ب) جریان شبکه، ج)  
جریان خروجی اینورتر ..... ۶۲
- شکل (۵-۱۲): وضعیت توان در شرایط افت ولتاژ و اعمال بار غیر خطی ..... ۶۳
- شکل (۵-۱۳): شماتیک سیستم پنل خورشید و جبران ساز متصل به شبکه و بار غیر خطی ..... ۶۴
- شکل (۵-۱۴): الف) جریان شبکه بدون جبراً ساز، ب) جریان شبکه با جبران ساز، ج) جریان بخش  
جبران ساز موازی ..... ۶۵
- شکل (۵-۱۵): تحلیل FFT برای شکل موج ولتاژ شبکه در صورت وجود هارمونیکهای مرتبه سوم و  
پنجم ..... ۶۷
- شکل (۵-۱۶): توان انتقالی بخشهای مختلف میکروگرید در حین افت ولتاژ ۵۰٪ ..... ۶۷
- شکل (۵-۱۷): شکل موج ولتاژ باس DC در حین افتادگی ولتاژ شبکه ..... ۶۸



# فصل اول: مقدمه

در دو دهه گذشته، مسائلی مانند گرمایش زمین و آلودگی هوا که اکثراً ناشی از مصرف بی رویه و روز افزون سوخت‌های فسیلی است و همچنین آلودگی‌ها و مسائل مربوط به دفن پسماندهای هسته ای و از طرف دیگر افزایش تقاضا برای انرژی برق، دست اندرکاران و تصمیم گیرندگان صنعت برق را براین داشته که به سوی تولید انرژی برق از منابع انرژی تجدید پذیر<sup>۱</sup> مانند انرژی خورشیدی، بادی و همچنین تکنولوژی‌های جدیدتر مانند پیل‌های سوختی<sup>۲</sup> گام بردارند. از سوی دیگر نیاز به احداث خطوط انتقال جدید و نیروگاه‌هایی که جوابگوی تقاضای روز افزون برای انرژی برق باشند با توجه به مسائل مالی و محدودیت‌های عملی برای ارتقا و یا احداث و نصب سیستم‌های جدید باعث شده که منابع تولید پراکنده در الگوهای نوین انرژی از جایگاه بالایی برخوردار شوند [۱]. برای مصارفی که نیاز به برق با قابلیت اطمینان بالا و یا کیفیت بالایی دارند می‌توان با احداث نیروگاه‌هایی با مقیاس کوچک و نزدیک به مراکز مصرف بار نیازهای فوق را پوشش داد. در این موارد دیگر نیاز به ارتقای زیر ساخت‌های موجود مانند خطوط انتقال و پست‌های توزیع و فوق توزیع وجود ندارد و با زیرساخت‌های یکسان می‌توان میزان زیادی از افزایش تقاضا برای انرژی برق را پوشش داد. گذشته از این، استفاده از این تکنولوژی و قرار گرفتن در مسیر تولید پراکنده، باعث ایجاد صرفه اقتصادی بیشتری می‌شود و در موارد زیادی به بهینه سازی سیستم موجود از نظر میزان تلفات، پروفیل ولتاژ و افزایش پایداری ولتاژ باس‌های توزیع کمک شایانی می‌کند.

استفاده از این منابع تولید پراکنده<sup>۳</sup> در برخی موارد می‌تواند منجر به مشکلات و مسائل خاص خود نیز شود. در این گونه سیستم‌های قدرت که در آن جهت شارش انرژی صرفاً از سمت نیروگاه‌ها به سایر قسمت‌های شبکه نمی‌باشد، مسائل رله و حفاظت به میزان زیادی تغییر می‌کند. بدین صورت که باید رله-

---

<sup>۱</sup> Renewable Energy

<sup>۲</sup> Fuel Cell

<sup>۳</sup> Distributed generation

های حفاظتی طوری تنظیم شوند که در درجه اول با شارش توان در دو جهت سازگار باشند و همچنین در مواقع خطا وارد عمل شده و از تزریق توان توسط منابع تولید پراکنده در محل خطا جلوگیری کنند. در حالت کلی می توان تاثیر استفاده از منابع تولید پراکنده را با در نظر گرفتن مزایا و معایبی که به همراه دارد مثبت ارزیابی کرد. مخصوصا با این دید که درصد زیادی از منابع تولید پراکنده از انرژی های نو و تجدید پذیر برای تولید انرژی خود استفاده می کند که به نوبه ی خود نقش بسیار تعیین کننده ای در کاهش استفاده از سوخت های فسیلی و اتمی دارد که در مسائل کلان جهانی مانند گرم شدن زمین و یا آب شدن یخ های قطبی که گستره جغرافیایی وسیعی از ساکنان کره زمین را تهدید می کند، می تواند بسیار مثبت واقع شود.

میکروگریدها<sup>۱</sup> یا ریزشبکه ها، شبکه های قدرت با ولتاژ پایینی هستند که شامل منابع انرژی پراکنده (DER) مانند میکروتوربین ها، سلولهای خورشیدی یا فتوولتایک<sup>۲</sup> و پیل های سوختی به همراه تجهیزات ذخیره انرژی مانند باتری و بارهای الکتریکی قابل کنترل هستند [۲]. میکروگریدها هم می توانند به صورت وصل به شبکه و هم به صورت جدا از شبکه (جزیره ای) کار کنند که قابلیت اطمینان و کیفیت توان را بهبود می بخشد. در صورت بروز اشکال در سیستم بالادست و یا ولتاژ بالای یک میکروگرید، می توان در صورت لزوم میکروگرید را از شبکه قدرت قطع نموده و به صورت جزیره ای استفاده کرد. با استفاده از روش های قطع بار<sup>۳</sup> می توان میزان کمی از بار موجود را قطع کرده و بقیه بار را که شامل بارهای حساس می باشند را با استفاده از انرژی تولیدی توسط منبع تولید انرژی داخل میکروگرید تامین کرد.

تولید پراکنده، می تواند نیاز به توسعه خط انتقال و ژنراتور نیروگاهی را تا حد زیادی کاهش دهد. استفاده از این منابع، همراه با تولید انرژی گرمایی به صورت همزمان که به CHP<sup>۴</sup> موسوم است باعث

---

<sup>1</sup> Micro Grid

<sup>2</sup> Photovoltaic

<sup>3</sup> Load shedding

<sup>4</sup> Combined Heat and Power

افزایش بهره وری از منابع موجود نیز می‌گردد. نزدیکی فیزیکی مرکز بار به محل تولید انرژی این امکان را فراهم می‌کند که از انرژی گرمایی تولید شده بتوان برای مصارف حرارتی مراکز بار استفاده کرد که باعث کم شدن اتلاف انرژی می‌شود که در نهایت به بالا رفتن بهره وری انرژی منجر خواهد شد.

مکان‌هایی که بیشترین استفاده از منابع تولید پراکنده را دارند معمولاً مراکزی هستند که به انرژی الکتریکی با کیفیت و قابلیت اطمینان بالا بهای زیادی می‌دهند [۳]. پیش از اینکه استفاده از منابع تولید پراکنده بتواند به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گیرد باید اثبات شود که راه اندازی این منابع هم برای مصرف کننده و هم برای شبکه‌ای که به آن متصل است منفعت دارد. تحقیقات بسیاری قابلیت کنترل و دنبال کردن توان در منابع تولید پراکنده را بررسی کرده اند [۴].

در دهه اخیر، استفاده از منابع تولید پراکنده شدت بیشتری یافته است. این افزایش ناشی از آلودگی‌های روز افزون هوا، مشکلات پیش روی توسعه شبکه‌های موجود و افزایش هزینه استفاده از سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی الکتریکی است [۵]. در میان منابع تولید پراکنده، انرژی خورشیدی با توجه به عدم آلاینده‌گی و در دسترس بودن آن و همچنین قابلیت تبدیل مستقیم آن به انرژی الکتریکی توسط سلولهای خورشیدی گزینه‌ای بسیار مطلوب برای استفاده در تولید پراکنده انرژی الکتریکی است. انرژی تولید شده توسط سلولهای خورشیدی به صورت DC در دسترس می‌باشد که با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت به شکل AC تبدیل می‌گردد.

گسترش سریع استفاده از بارهای غیرخطی در صنایع و شبکه‌های توزیع، باعث مشکلاتی در کیفیت توان داده شده به مشترکین می‌شود. مشکلات در کیفیت توان همچنین باعث مسایل عدیده‌ای در جای جای شبکه می‌گردد از قبیل افزایش هارمونیک‌ها، اشتباه در عملکرد رله‌ها، کاهش بهره‌وری شبکه‌های انتقال، شبکه‌های توزیع، افزایش تلفات و گرم شدن ترانسفورماتورها می‌گردد [۶].

جبران کننده‌ها ادواتی هستند که شامل مبدل‌های DC/AC قابل کنترل می‌باشند. این جبران



کننده‌ها بسته به روش کنترلی آنها می‌توانند مشکلات ولتاژ و همچنین هارمونیک‌های ناخواسته جریان دو سر بار را جبران نمایند. تلاشهایی برای استفاده از جبران کننده‌های اکتیو در منابع تولید پراکنده و تجدید پذیر برای استفاده از مزیت‌های هردوی این سیستم‌ها شده است. استفاده از جبران کننده‌های اکتیو در منابع تولید پراکنده، باعث تولید انرژی الکتریکی بدون آلاینده‌گی و با کیفیت بالا برای مصرف کننده می‌شود [۷]. از سوی دیگر، استفاده از منابع تولید پراکنده و تجدید پذیر، در حضور بارهای غیرخطی خود باعث ایجاد مشکلاتی در کیفیت توان می‌شود لذا با توجه به عدم کارایی بالای جبران کننده، استفاده از جبران کننده‌های اکتیو در جبران این ضعف منابع ضروری به نظر می‌رسد [۸].

جبران کننده‌های اکتیو بسته به روش کنترلی و سخت افزار در دسترس، می‌توانند شامل جبران کننده‌های اکتیو سری و یا جبران کننده‌های اکتیو موازی باشند [۹]. طراحی و کنترل توان یک منبع تولید پراکنده شامل یک سیستم فتوولتاییک (PV) و کنترل کننده جامع را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد: طراحی کنترل کننده جبران کننده‌های اکتیو موازی، دنبال کردن نقطه توان ماکزیمم<sup>۱</sup> (MPPT) و استراتژی کنترلی باس DC.

الگوریتم جبران سازی جبران کننده‌های اکتیو موازی باعث حذف مولفه‌های جریان‌های ناخواسته می‌شود. در [۱۰] تئوری حل بهینه<sup>۲</sup> (OS) برای برنامه ریزی جبران کننده‌های اکتیو موازی ارائه شده است. گرچه این روش پیاده سازی ساده‌ای دارد ولی فقط برای سیستم‌های متقارن و سه سیمه معتبر می‌باشد. تئوری OS منجر به جریان‌های ناخواسته در ترمینال‌های بار در سیستم‌های شامل مولفه ولتاژ منفی می‌شود. از این رو تئوری جامع توان لحظه‌ای<sup>۳</sup> (GTIP) توسط [۱۱] ارائه شده است. این تئوری در سیستم‌های سه سیمه نتایج خوبی به دنبال دارد. در [۱۲] تئوری OS به عنوان پایه‌ای برای تئوری GTIP معرفی شده است. بدین ترتیب، الگوریتم‌های جبران بر پایه GTIP در سیستم‌های سه فاز چهارسیمه

---

<sup>1</sup> Maximum Power Point Tracking

<sup>2</sup> Optimal Solution

<sup>3</sup> Generalized Theory of Instantaneous Power

باعث ایجاد مولفه صفر جریان می شود [۱۲]. تئوری پیشرفته جامع توان لحظه ای از سوی دیگر جواب-های قابل قبولی در سیستم‌های چهار سیمه سه فاز می‌دهد [۱۲].

یکی دیگر از جنبه‌های طراحی این سیستم، طراحی یک سیستم MPPT مناسب می‌باشد. MPPT یکی از مهمترین مسائل موجود در تمامی سیستم‌های شامل سلول‌های خورشیدی است. خروجی توان یک سلول خورشیدی بستگی به دمای پیرامون، شدت تابش نور و امپدانس متصل به دو سر آن دارد. در هر سلول خورشیدی، در شرایط دما و نور ثابت، یک نقطه کار بهینه وجود دارد که تولید توان در آن حداکثر است و پیدا کردن این نقطه برای استفاده بهینه و اقتصادی از سلول خورشیدی موجود، بسیار با اهمیت است. روش‌های بسیاری برای دنبال کردن نقطه حداکثر توان ارائه شده است [۱۳]. این روش‌ها از نظر پیچیدگی الگوریتم و پیاده سازی، سرعت پاسخ، هزینه، و نوع سخت افزار مورد نیاز با هم متفاوت هستند [۱۳]. در یک طبقه بندی کلی، این روشها به دو دسته‌ی آنالاین (برخط) و آفلاین (برون خط) تقسیم بندی می‌شوند. روش‌های آفلاین بر مبنای مدل در دسترس از سلول خورشیدی عمل می‌کنند و روش‌های آنالاین نیازی به مدل ندارند. در [۱۴] روش‌های مختلف آنالاین و آفلاین مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این پایان نامه از روش مبتنی بر جریان نقطه کار بهینه استفاده می‌شود که ترکیبی از هر دو روش این روش‌ها می‌باشد.

ساختار این پایان نامه به این صورت است: در فصل دوم به بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه مسائل اتصال به شبکه سیستم‌های فتوولتائیک پرداخته می‌شود. در فصل سوم سیستم فتوولتائیک معرفی و مدل می‌شود و همچنین تئوری تکمیلی توان لحظه‌ای بیان می‌گردد. الگوریتم‌های کنترلی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه در فصل چهارم آورده می‌شود. در فصل پنجم مدل سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه و کنترل آن شبیه سازی شده و نتایج آن مورد تحلیل قرار می‌گیرد و سرانجام در فصل ششم نتایج کلی پایان نامه بیان می‌شود و پیشنهادات مورد نظر جهت تحقیقات آینده ارائه خواهد شد.

# فصل دوم: مروری بر پیشینه

## تحقیق

## ۱-۲ مقدمه

از اواسط ۱۹۸۰ به بعد، در عرصه تأمین انرژی الکتریکی تحول بزرگی اتفاق افتاد و تولید از یک نقطه از شبکه غیر متمرکز مطرح شد. سابقاً نیروگاه‌ها مراکز متمرکز بزرگی را تشکیل می‌دادند، این در حالی است که روند امروز به سمت بهره‌برداری از واحدهای نیروگاهی کوچک در مناطق گسترده‌ای از محیط‌های جغرافیایی پیش می‌رود. این نوع از واحدهای تولید چند ظرفیتی که در نزدیکی واحدهای مصرف کننده انرژی واقع می‌شوند، تولید پراکنده نامیده می‌شوند [۱۵].

فرآیند عملیاتی کردن تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع برق با تعریف ریز شبکه یا میکروگریدها آغاز می‌شود. میکروگریدها یا ریزشبکه‌ها، شبکه‌های قدرت ولتاژ پایینی هستند که شامل منابع انرژی پراکنده<sup>۱</sup> (DER) مانند میکروتوربین‌ها، سلولهای خورشیدی یا فتوولتایک و پیل‌های سوختی به همراه تجهیزات ذخیره انرژی مانند باتری و بارهای الکتریکی قابل کنترل هستند [۱۶].

در میان منابع تولید پراکنده، انرژی خورشیدی با توجه به عدم آلاینده‌گی و در دسترس بودن آن و همچنین قابلیت تبدیل مستقیم آن به انرژی الکتریکی توسط سلول‌های خورشیدی گزینه‌ای بسیار مطلوب برای استفاده در تولید پراکنده انرژی الکتریکی است. انرژی تولید شده توسط سلول‌های خورشیدی به صورت DC در دسترس می‌باشد که با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت به شکل AC تبدیل می‌گردد.

امروزه بیشتر منابع تولید توان فتوولتایک به یک شبکه عمومی متصل هستند. اساسی‌ترین مشکلات پیش روی جهت این اتصال، مسائل کیفیت توان تولیدی و پایداری شبکه است. از مهمترین مسائلی که در بحث کیفیت توان ارئه شده به شبکه مطرح می‌باشد، وقوع افتادگی ولتاژ به سبب وجود خطا در شبکه و

---

<sup>1</sup> Distributed Energy Resources

همچنین اعوجاجات جریان و ولتاژ به سبب حضور بارهای غیر خطی است. دلایل ایجاد افتادگی ولتاژ متغیر است، اتصال کوتاه بین فاز با فاز یا فاز با زمین، وجود بارهایی با توان بالا در شبکه، راه اندازی موتورهای سنگین و دیگر موارد از جمله عوامل وقوع این پدیده می باشد [۱۷].

در این فصل با مرور و بررسی طرح‌های انجام شده، زمینه برای ارائه مدلی مناسب که نگرانی‌های موجود را بررسی و کنترل نماید، فراهم می‌گردد.

## ۲-۲ اینورترهای سری و موازی

از معمولترین روش‌های مورد استفاده جهت دستیابی به شرایط مناسب سیستم توزیع الکتریکی در هنگام وقوع خطا بکارگیری اینورترهای است که به صورت سری و یا موازی بین یک میکروگرید و شبکه عمومی ارتباط توانی برقرار می‌کنند. مسئله کنترل اینورترها در حل مشکلات کیفیت توانی تنها با شناخت و متغیرهای تاثیر گذار بر این ادوات امکان پذیر می‌باشد. در مقاله [۱۸] به بررسی مشخصات انواع اینورترها پرداخته شده است. براساس تحقیقات انجام شده در این تحقیق مسائل زیر مطرح شده است:

- اینورترهای سیستم فتوولتاییک رفتار ساده ای ندارند. مشخصات حساسیت آنها با یک منحنی مستطیلی به صورت دقیقی قابل بیان نیستند.
- در کارکرد حالت پایدار، اینورترها در شرایط افتادگی ولتاژ شبکه، جهت ثابت ماندن توان خروجی، تمایل به افزایش جریان AC از خود نشان می دهند. با وجود اینکه بیشتر اینورترها عملکرد سریعی و کافی‌ای جهت جبران سازی اغتشاشات ولتاژ ندارند.
- بسته به ابزار تحت شرایط حفاظت ولتاژ، بین اینورترها تفاوت فراوانی مشاهده شده است. برای بسیاری از اینورترها، شدت افت ولتاژ به نظر می‌رسد با ماکزیمم تحمل اینورترها همراه باشد.

- رفتار اینورترها متأثر از دینامیک‌های متفاوتی از جمله حلقه کنترل جریان و ردیاب MPP می‌باشد. مخصوصاً ردیاب MPP یک اهمیت اساسی دارد چراکه آن‌ها معمولاً کندترین بخش اینورترها به شمار می‌روند و این موضوع را هنگام مدل کردن اینورترهای سیستم فتوولتاییک باید به دقت مورد نظر داشت.

- اگرچه همیشه دلیل قطع به درستی بیان نمی‌گردد، برخی از این موارد در زیر آورده شده است:

- جهت عملیات حفاظت ولتاژ

- مسئله کنترل جریان AC و جریانهای بیش از حد

- عملیات مانیتورینگ اجزای DC

- عدم کارکرد ردیاب MPP (معمولاً عملکرد کندی دارند)

- قطع سویچ تمامی اینورترها به جهت طولانی شدن فرایند راه اندازی

- برخلاف بقیه تجهیزات از جمله کنتاکتورها، بهره برداری توان در شرایط قبل از افتادگی ولتاژ و دامنه موج تقریباً تاثیری بر روی حساسیت ندارد، اینورترهای بررسی شده نسبت به پرش زاویه فاز بسیار حساس می‌باشند.

- اینورترها قادر به تحمل افتادگی‌های شدید ولتاژ هستند.

- عموماً اینورترهای سیستم فتوولتاییک نسبت به افت‌های ولتاژ بسیار حساس هستند که می‌تواند تاثیری منفی بر روی طول عمر اجزای سیستم فعال در شبکه داشته باشد.

به علاوه آنها باید نسبت به افتادگی‌های ولتاژ جهت جلوگیری از وقوع شرایط جزیره‌ای شدن، ایمن‌تر

باشند. در این زمینه نیاز به یک منحنی دو مرحله‌ای به اینورترهای سیستم فتوولتاییک این امکان را می‌-

دهد که با تقریب بهتری مورد بررسی قرار گیرند، احساس می‌شود. از این رو می‌توان فرض کرد که با

تلاش جهت طراحی بهتر اینورترها، ظرفیت ماندن در شبکه تحت شرایط خطا بهبود می‌یابد.

با در نظر گرفتن این موضوع که هنگام وقوع انواع خطا و هنگامی که تزریق توان راکتیو مطابق استانداردهای شبکه نباشد، اینورترها سیستم میکروگرید را در وضعیت قطع از شبکه قرار می‌دهند، مسئله کنترل یک اینورتر یک و دو طبقه منبع ولتاژ در نیروگاه‌های خورشیدی تحت شرایط خطاهای متغیر شبکه، در مقاله [۱۹] مورد بحث قرار گرفته است. در این مقاله استراتژی کنترلی جدیدی دو مرحله‌ای در سیستم‌های خورشیدی متصل به شبکه معرفی شده است. این مدل کنترلی، موضوع قطع اینورترها در این شرایط را برطرف کرده است.

یکی از مسائل مهم در سیستم‌های تولید پراکنده جبران ولتاژ نقطه اتصال این سیستم‌ها به شبکه است. در مقاله [۲۰] الگوریتم کنترلی جدیدی برای مبدل اینورتر سلول خورشیدی برای حل این موضوع ارائه شده است. با این کار اینورتر در طول یک روز کاری قادر به جبران توان راکتیو، تنظیم ولتاژ در شرایط افتادگی و برآمدگی حتی تحت شرایط معمولی می‌باشد. جبران سازی ولتاژ در نتیجه تزریق جریان از سمت اینورتر سری صورت می‌پذیرد تا تحت شرایط خطا، مقدار ولتاژ در حالت ثابتی قرار بگیرد. مدل کنترلی موجود در این مقاله که به صورت یادگیری تکراری<sup>۱</sup> (ILC) عمل می‌کند، با حذف هارمونیک‌ها در نقطه اتصال به شبکه، ولتاژ مطلوب را ایجاد می‌کند. با در نظر گرفتن این موضوع که سیستم ریز شبکه یا میکرو گرید در حالت عادی از تغییرات فرکانس متاثر می‌گردد، این سیستم کنترلی، حتی در شرایطی که فرکانس شبکه متغیر باشد، ولتاژ بار را به صورت خودکار با ولتاژ شبکه سنکرون خواهد کرد.

باید در نظر داشت که وضعیت سیستم در حالت وقوع خطاهای شبکه باعث نوسان توان خروجی اینورتر پنل فتوولتاییک شده و جریان خروجی تحت شرایط ولتاژ نامتعادل ایجاد می‌شود که افزایش خواهد یافت. در مقاله [۲۱] فرمول جریان مرجع و مدل ضرایب بهینه آن برای اینورترهای سیستم فتوولتاییک

---

<sup>1</sup> Iterative Learning Controller

تحت شرایط افتادگی ولتاژ شبکه محاسبه شده و نیازمندیهای کنترل توان اکتیو و راکتیو شبکه ارضا شده است. سپس تحلیل هارمونیک‌های اعوجاجی جریان، پیک جریان سه فاز، نوسانات توان اکتیو و راکتیو، نوسانات ولتاژ DC و ضریب کنترلی جریان مرجع خروجی استخراج شده است. با در نظر داشتن محدودیت‌های جریان فاز اینورتر و نوسانات ولتاژ خازن باس DC، مدل بهینه جریان مرجع اینورتر با مینیمم کردن مقادیر بدست آمده برای توان اکتیو و راکتیو تحت این شرایط ایجاد شده است. در مقاله [۲۱] نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی، جهت انتشار توان اکتیو و راکتیو سیستم فتوولتاییک تحت شرایط افت ولتاژ، کنترلی انعطاف پذیر دارد و محدودیت های THD<sup>۱</sup> جریان، پیک جریان فاز و اندازه نوسانات ولتاژ DC اینورتر سیستم فتوولتاییک را ارضا خواهد کرد. همچنین در این مقاله، با شبیه سازی سیستم تولید فتوولتاییک بر اساس طرح کنترلی<sup>۲</sup> DBCIL، مشاهده می‌شود که با استراتژی کنترلی پیشنهادی می‌توان THD جریان خروجی به کمتر از ۰.۵٪ برسد.

مقاله [۲۲] به این موضوع پرداخته است که برای جلوگیری از جزیره‌ای شدن شبکه در حین وقوع افتادگی ولتاژ، مطابق قوانین شبکه اسپانیا، منابع تجدید پذیر موجود باید در حالت قطع قرار گیرند. این موضوع ممکن است پایداری سیستم را در مواردی که درصد زیادی از انرژی مورد استفاده از منابع تجدید پذیر تامین گردد و همچنین انگیزه عملی کردن قوانین وضع شده را تهدید کند. قوانین جدید شبکه نسبت بین جریان اکتیو و راکتیو در حین افتادگی ولتاژ و نیازمندیهای نیروگاه برای بهره برداری نرمال از آنها هنگامی که افتادگی ولتاژ پایان می‌یابد را در نظر گرفته است. در این شرایط تاسیسات موجود نیز به واسطه استفاده بهینه از این منابع متاثر خواهند گشت. از آنجایی که تغییر اساسی تاسیسات موجود غیر عملی می‌باشند، این مقاله [۲۲] از افزونه موازی برای ادوات الکترونیک قدرت جهت مطابقت با

---

<sup>1</sup> Total harmonic distortion

<sup>2</sup> dead beat current inner loop



دستورالعمل‌های جدید شبکه برای ریز شبکه‌ها، بدون اصلاح اینورترهای سیستم بهره گرفته است. ابزار و الگوریتم‌های کنترلی آنها در مقاله [۲۲] توضیح داده شده و نتایج آزمایشگاهی با استفاده از اینورترهای فتوولتاییک بدون ظرفیت ماندن در شبکه، در حالت افت ولتاژ آورده شده است. اینورترهای فتوولتاییک در حین افتادگی ولتاژ به عملکرد خود ادامه داده و هنگامی که افتادگی ولتاژ برطرف گردید با اقدام سریع و به آرامی به شرایط نرمال شبکه باز خواهند گشت. در این مقاله یک اتصال موازی برای ادوات قدرت ارائه شده است که با استفاده از اینورترهای فتوولتاییک موجود، شرایط مطابقت با قوانین جدید شبکه برق اسپانیا فراهم گردد. هنگامی که افتادگی ولتاژ شناسایی شد، این واحد، پنل خورشیدی را ایزوله کرده و حین افتادگی ولتاژ، اینورترهای پنل خورشیدی، توان را در لینک DC ابزار معرفی شده جریان خواهند داد و توان مصرف نشده در مقاومت با مبدل DC به DC کمکی هدر نخواهد رفت. هنگامی که افتادگی ولتاژ برطرف شد، پنل خورشیدی در حالتی نرم به صورت سریع به شبکه متصل خواهد شد.

در مقاله [۲۳] نیز عملکرد سیستم تولید فتوولتاییک در شرایط افت ولتاژ شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. برای کنترل مبدل DC به AC یک الگوریتم کنترلی در فضای d-q ارائه شده که این الگوریتم باعث مبادله توان ثابتی بین سیستم فتوولتاییک و شبکه می‌شود. سیستم فتوولتاییک عملکرد مناسبی را تحت شرایط خطا از خود نشان داده و شبکه در وضعیت افتادگی ۰.۶ پریونیت ولتاژ پایداری خود را حفظ می‌کند. در مقاله [۲۴] نیز بررسی اثرات یک نیروگاه تولید فتوولتاییک بر روی افتادگی ولتاژ مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مدل احتمالی خطای افت ولتاژ بر مبنای روش مونت کارلو ایجاد شده است و دو مورد تحلیل بر روی واحد تولیدی فتوولتاییک متصل به شبکه به صورت ظرفیت یکسان این سیستم فتوولتاییک در محل‌های متفاوت و همچنین محل‌های مشابه با ظرفیت‌های مختلف انجام می‌شود.

در ادامه این بحث، مقاله [۲۴] با مقایسه سیستم بدون عملکرد فتوولتاییک، تاثیر ظرفیت و محل اتصال پنل به شبکه بر روی فرکانس افت ولتاژ مطرح می‌شود و در آن یک مرجع برای تحقیق بر سیستم

فتوولتاییک متصل به شبکه ایجاد می‌کند. در این مقاله مشکلات مربوط به یک مدل فتوولتاییک خاص مورد تحلیل قرار می‌گیرد. به خاطر خاصیت تصادفی توان شبکه، همه نوع اطلاعات خطا به کمک مونت کارلو شبیه سازی شده تا مدل توزیع احتمالی ایجاد شود. این فرایند برای خاصیت تصادفی خطاها بسیار مناسب است و یک مقدار مرجع خوب به حساب می‌آید. در این مقاله تاثیرات ظرفیت فتوولتاییک و محل اتصال به شبکه پنل در ۱۴ نقطه شبکه توزیع مورد مطالعه قرار می‌گیرد و همچنین تاثیرات نیروگاه خورشیدی بر روی افت ولتاژ شبکه توزیع ولتاژ پایین به دست خواهد آمد.

از سوی دیگر در مقاله [۲۵] یک سیستم کنترلی متشکل از یک پنل خورشیدی متصل به شبکه و یک واحد مدیریت کیفیت توان که به صورت یک فیلتر اکتیو موازی است، ارائه شده است. با این سیستم، واحد تولید فتوولتاییک تنها در زمینه تولید توان عمل نکرده و کاهش هارمونیک‌های جریان، جبران توان راکتیو، حذف اثرات افتادگی، بالازدگی و قطع ولتاژ را نیز بر عهده خواهد داشت. یک الگوریتم دنبال کردن توان ماکزیمم پیشبینی و فقی برای بهبود عملکرد تولید سیستم فتوولتاییک در نظر گرفته شده است. برای سادگی مسئله کنترل از روش قاب مرجع سنکرون در مدل کردن اینورترها استفاده شده است. همچنین برای دستیابی به یک پاسخ دینامیکی خوب، ساختار حلقه کنترلی جریان داخلی و یک حلقه کنترلی ولتاژ خارجی به کار گرفته شده است. مدل مورد استفاده در این مقاله در مواقعی که نور خورشید در دسترس است کار انتقال توان اکتیو، جبران سازی توان راکتیو و هارمونیک‌های جریان را انجام می‌دهد. این سیستم همچنین با مجهز شدن به تعداد زیادی باطری و بدون کمک واحد فتوولتاییک، هارمونیک‌ها را تضعیف کرده و جبران سازی توان راکتیو را انجام می‌دهد، همچنین افتادگی، بالازدگی و قطع‌های موقتی را نیز جبران می‌کند. سیستم در قاب dq چرخان با یک استرژژی کنترلی مجزا مدل شده است. در این طرح، بردار ولتاژ جهت دار قاب مرجع برای کنترل اینورتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با توجه با این موضوع که نفوذ سیستم‌های فتوولتاییک در شبکه به سرعت در حال رشد است. قوانین

جدید شبکه به صورت دقیقتری با این افزایش نفوذ وضع می‌شوند. شرایط اتصال به شبکه در حین وقوع خطای شبکه با اختلالات متنوعی مواجه می‌شود. هنگامی که خطا در قسمتی از شبکه اتفاق می‌افتد، ولتاژ در نقطه اتصال به شبکه بسیار پایین می‌آید که تاثیر فراوانی بر روی تعادل ولتاژ لینک DC خواهد گذاشت. این افزایش ولتاژ در لینک DC ممکن است سبب خسارت بر روی اینورتر شود. همچنین افت ولتاژ ممکن است سیستم فتوولتایک را مطابق قوانین شبکه به حالت قطع در آورد. قطع گسترده سیستم فتوولتایک تاثیرات منفی در بهره برداری کلی شبکه خواهد داشت. در مقاله [۲۶] از مقاومت‌های ترمزی دینامیکی سری<sup>۱</sup> (SDBR) برای مقابله با تاثیر خطاهای شبکه و جلوگیری از وقوع افت ولتاژ در سایر قسمت‌های شبکه استفاده شده است. اصلاح افت ولتاژ به کمک روش پیشنهادی توانایی کارکرد در ولتاژ پایین<sup>۲</sup> (LVRT) نیروگاه خورشیدی را افزایش می‌دهد. در این شرایط SDBR در شرایط خطا قبل از بریکرها در شبکه شروع به کار خواهند کرد.

باید در نظر داشت که اینورترهای قدرت متصل شده به شبکه، نسبت به اغتشاشات شبکه بسیار حساس می‌باشند و بر نیاز کاهش اثرات اغتشاشات ولتاژ بر عملکرد اینورترها در این سیستم بسیار تاکید می‌شود. افتادگی ولتاژ بیشترین تاثیر را بر عملکرد اینورترهای منبع ولتاژ در سیستم‌های تولید پراکنده دارد. در مقاله [۲۷] با شبیه سازی مدل ارائه شده مشاهده می‌شود که با وقوع افت ولتاژ در سیستم، جریان اینورتر به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. برای حفاظت اینورتر در حین افزایش جریان و همچنین افزایش دامنه ولتاژ در خازن از محدود کننده جریان خطا<sup>۳</sup> (FCL) استفاده می‌شود. اگر افت ولتاژ در ۰.۵ تا ۳۰ سیکل اتفاق بیافتد محدود کننده جریان خطا، جریان سویچینگ ادوات قدرت را به خوبی محدود خواهد کرد. بنابراین اگر فتوولتایک در شرایط وقوع افت ولتاژ به شبکه متصل باشد، جریان سویچینگ در حد نرمال باقی خواهد ماند.

---

<sup>1</sup> series dynamic braking resistor

<sup>2</sup> low voltage ride through

<sup>3</sup> fault current limiter

یکی از نکات جالب در بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که اینورترهای سیستم‌های فتوولتاییک بدون ترانسفورماتور به سرعت گسترده‌ای جهت دستیابی به کارایی مناسب در سطح بالای نفوذ سیستم‌های خورشیدی تاثیر گذار خواهند بود. این موضوع مسائل توزیع سیستم‌های مجتمع خورشیدی را نیز بیشتر می‌کند برای مثال توقف ناگهانی همه پنل‌های خورشیدی ممکن است به اغتشاشات ایجاد شده در کل شبکه منجر شود. بنابراین استانداردها برای سرویس‌های جانبی در تولیدات خورشیدی در بسیاری از کشورها در حال بازبینی می‌باشند. برای بررسی چالش‌های پیش روی، قابلیت کارکرد در ولتاژ پایین (LVRT) سه اینورتر فتوولتاییک بدون ترانسفورماتورها تک فاز در شرایط خطای شبکه در مقاله [۲۸] مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین استراتژی‌های کنترل با تزریق توان راکتیو نیز در این کار مورد بحث واقع شده است. در این مقاله اینورترهای تمام پل با مدلاسیون دو قطبی، اینورتر تمام پل با بای پس DC و اینورتر<sup>۱</sup> HERIC انتخاب شده است. برای بررسی این موارد، یک سیستم فتوولتاییک ۱ کیلو وات تک فاز متصل به شبکه مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

با در نظر داشتن این مهم که هنگام وقوع حالت افتادگی ولتاژ، جریان اعمالی از سمت اینورتری که سیستم فتوولتاییک را به شبکه متصل می‌کند، افزایش می‌یابد تا توان تزریقی به بار همچنان ثابت باقی بماند، از این رو این بهره برداری غیر عادی ممکن است منجر به قطع ناخواسته سیستم فتوولتاییک از شبکه در شرایط جریان‌های زیاد شود. در مقاله [۲۹] یک کنترلر برای یک اینورتر سه فاز فتوولتاییک معرفی شده است تا در مقایسه با اینورترهای معمول اطمینان حاصل شود که مقدار پیک جریان تزریقی از سمت سیستم فتوولتاییک به نقطه اتصال شبکه مینیمم شده است. نتایج آزمایشگاهی موثر بودن مدل پیشنهاد شده کنترلی را به خوبی نشان می‌دهد. در این مطالعه که بر اساس الگوریتم مورد استفاده در مقاله [۳۰] طراحی شده است به این صورت است که با انتخاب جریان‌های مرجع مناسب، خطاهای شبکه

---

<sup>1</sup> Highly Efficient and Reliable Inverter Concept

را برطرف نموده و به کیفیت توان مورد نیاز دست خواهد یافت. همچنین مدل طراحی شده با امتحان و جستجوی مقادیر بهینه برای متغیرهای کنترل، پیک جریان‌ها در حین افتادگی ولتاژ را حداقل می‌کند. از نگاهی دیگر کیفیت توان یک اینوتر فتوولتاییک سه فاز به شدت با وقوع خطاهای ولتاژهای نامتعادل از سمت شبکه رو به وخامت خواهد رفت. اعوجاج در توان تزریقی و افزایش هارمونیک‌های جریان از جمله اثرات منفی تولید شده به وسیله این نامتعادلی‌های ولتاژ است. طرح‌های متعددی جهت کنترل خطاهای شبکه تحت نامتعادلی‌های ولتاژ شبکه در دسترس است. این طرح‌ها معمولاً مشخصات زیادی برای کیفیت توان در نظر دارند. بسیاری از آن‌ها وجود اعوجاج در توان در حین افتادگی ولتاژ که منجر به ایجاد جریان هارمونیک می‌شود را در نظر نگرفته‌اند. در مقاله [۳۱] عملکرد اینوترهای سیستم فتوولتاییک تحت شرایط افتادگی ولتاژ مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. در این مقاله سه تئوری در نظر گرفته می‌شود:

۱: یک طرح کنترلی شامل کنترل خطاهای مذکور در چند مورد خاص

۲: استراتژی کنترلی بر مبنای استفاده از مقادیر پیوسته برای متغیرهای کنترلی

۳: سه الگوریتم کنترلی متفاوت برای محاسبه مقادیر پیوسته متغیرهای کنترلی

این مسائل به صورت تجربی با استفاده از یک آزمایشگاه پردازش سیگنال دیجیتال تایید شده است. در این مقاله یک طرح کنترلی خطای شبکه برای اینوترهای یک سیستم فتوولتاییک سه فاز تحت افتادگی ولتاژ نامتعادل معرفی شده است. طرح‌های کنترلی قبلی را می‌توان به عنوان موردهای خاص از این کنترلر به وسیله تعریف دو متغیر کنترلی گسسته در نظر گرفت. در این مقاله برای متغیرهای کنترلی جهت دستیابی به مشخصات کیفیت توانی (پارامترهای کنترلی گسسته تنها مقادیر حداکثری کیفیت توانی را بدست می‌آورند) از مقادیر پیوسته ارائه می‌دهد. سه الگوریتم کنترلی برای محاسبه مقادیر پیوسته متغیرهای کنترلی نیز ارائه شده است. چندین تست آزمایشگاهی انجام شده مشخصات الگوریتم کنترلی را نشان می‌دهد. انتظار می‌رود که کارکرد انعطافی اینوترتر سیستم خورشیدی در این طرح در آینده با

استانداردهای بین المللی دقیق تر برای اتصالات شبکه بسیار وفق پذیر باشد.

باید در نظر داشت که تاثیر افتادگی ولتاژ بر روی سیستم‌های با درصد بالای نفوذ تولید توان فتوولتاییک، تنها در شبکه‌های با ولتاژ پایین واضح نیست، بلکه برای شبکه‌های ولتاژ متوسط و ولتاژ بالا نیز می‌توان این تاثیر پذیری را مشاهده کرد. برای کاهش چنین تاثیری، نیازمندیهای خطای حین کار شبکه<sup>۱</sup> (FRT) یک راه حل امیدوار کننده محسوب می‌گردد. تاثیر بهبود آن بر روی پاسخ ولتاژ با استفاده از یک مدل واقعی سیستم متشکل از شبکه‌های ولتاژ متوسط و ولتاژ بالا در ژاپن در مقاله [۳۲] مورد آزمایش قرار گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که نیاز FRT به شکل قابل توجهی پاسخ ولتاژ دینامیکی تحت شرایط افتادگی ولتاژ با عدم قطع هیچ کدام از بارهای شبکه را بهبود می‌بخشد. نتایج شبیه سازی مدل مطرح شده نشان می‌دهد که در حین کاهش توان خروجی در شرایط افتادگی ولتاژ، پدیده بازیابی آرام ولتاژ بعد از خطا، بدون نیاز FRT اتفاق خواهد افتاد.

اگر قطع خودکار بار قابل چشم پوشی باشد، برای مثال افتادگی ولتاژ کمتر از ۲۰٪ باشد، نیاز FRT برای سطح LVRT حین افتادگی ولتاژ در مقایسه با هنگامی که نیاز FRT برای بازیابی توان خروجی بعد از افت ولتاژ تنها تاثیر مثبت کوچکی در پاسخ ولتاژی ایجاد می‌کند یک بهبود قابل توجهی را در پاسخ ولتاژ نشان می‌دهد.

---

<sup>1</sup> Fault Ride Through Requirement

# فصل سوم: مدل‌ها و تئوری‌های

## تحقیق

## ۱-۳ مقدمه

اقدام به اجر ای عملیات کنترلی در سیستم‌های الکتریکی با شناخت دقیق مدل المان‌های به کار رفته در این سیستم‌ها امکان پذیر می‌شود. از این رو طراحی هر سیستمی که منجر به کنترل یک واحد خورشیدی شود با استخراج مدل ریاضی واحد فتوولتاییک همراه می‌باشد. در این فصل ابتدا به معرفی پنل‌های خورشیدی و تشریح ساختار آن پرداخته می‌شود و مدل ریاضی جهت شبیه سازی این سیستم ارائه می‌گردد. سپس در ادامه تئوری‌های توان لحظه‌ای مورد استفاده در الگوریتم‌های کنترلی سیستم فتوولتاییک معرفی خواهد شد.

## ۲-۳ نیروگاه های خورشیدی

دانشمند فرانسوی، ادموند بکوئرل، در حدود سال‌های ۱۸۴۰ کشف کرد که تعدادی از مواد می‌توانند هنگامی که نور به آنها تابیده شود، جریان الکتریسیته تولید کنند. سلول‌های فتوولتاییک همان‌هایی هستند، که مسئول تولید جریان الکتریسیته می‌باشند. بعد از آن در سال ۱۹۵۰ در آزمایشگاه بل نیوجرسی دو دانشمند در بررسی اثر نور بر نیمه هادی‌هایی چون سلیکون و ژرمانیوم نتایج جالبی بدست آوردند، که منجر به ساخت سلول‌های فتوولتاییک امروزی شد.

سلول‌های فتوولتاییک اولین بار برای تأمین انرژی مورد نیاز ماهواره‌ها در فضا مورد استفاده قرار گرفت.

## ۱-۲-۳ مدل سازی پنل خورشیدی

ساختار فیزیکی یک سلول خورشیدی مانند یک دیود است که پیوند p-n آن در معرض نور خورشید قرار می‌گیرد. انرژی جذب شده حاصل از شدت نور در این ناحیه به تولید و انتقال حامل‌ها (الکترون‌ها و

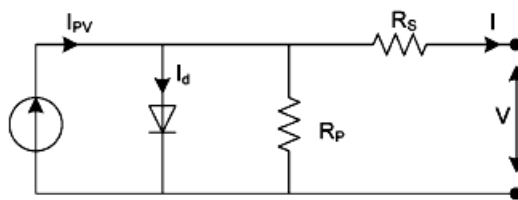


حفره‌ها) و جمع آوری آنها در ترمینال خروجی منجر می‌شود. معادله‌های (۱-۳) و (۲-۳) که اساس تئوری نیم هادی‌ها را بیان می‌کند، مشخصه I-V یک سلول ایده‌آل را توصیف می‌کند [۳۳].

$$I = I_{pv, cell} - I_d \quad (1-3)$$

$$I_d = I_{o, cell} \left[ \exp\left(\frac{qV}{aKT}\right) - 1 \right] \quad (2-3)$$

که  $I_{pv, cell}$  جریان تولید شده از نور تابشی،  $I_d$  جریان دیود طبق معادله‌ای دیودی شوکلی<sup>۱</sup>،  $I_{o, cell}$  جریان اشباع معکوس یا جریان نشتی دیود،  $q$  بار الکترون،  $K$  ثابت بولتزمن<sup>۲</sup>،  $T$  دمای پیوند p-n و  $a$  ثابت ایده آلی دیود است.



شکل (۱-۳): مدار معادل پنل خورشیدی

شکل (۱-۳) مدار معادل یک پنل خورشیدی را نشان می‌دهد. یک پنل خورشیدی از چندین سلول فتوولتاییک که دارای اتصال بیرونی سری یا موازی و یا سری- موازی تشکیل شده است. با در نظر گرفتن پارامترهای شکل (۱-۳) در رابطه (۱-۳)، مشخصه پنل خورشیدی بدست می‌آید [۳۳].

$$I = I_{pv} - I_o \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{aV_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (3-3)$$

<sup>1</sup> Shockley diode equation

<sup>2</sup> Boltzmann constant

که  $I_{pv}$  جریان فتوولتاییک،  $I_o$  جریان اشباع معکوس،  $V_t = \frac{N_s KT}{q}$  ولتاژ حرارتی<sup>۱</sup>،  $N_s$  تعداد

سلول‌های سری شده،  $R_p$  و  $R_s$  مقاومت معادل‌های سری و موازی پنل خورشیدی می‌باشند. که  $I_o$  و  $I_{pv}$  با شدت نور و تغییر دما به صورت زیر مرتبط می‌باشند.

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (۴-۳)$$

$$I_o = I_{o,n} \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_g}{aK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (۵-۳)$$

که  $I_{pv,n}$  جریان فتوولتاییک در شرایط استاندارد ( $G_n=1000 \text{ W/m}^2$  و  $T_n=25^\circ \text{C}$ )،  $K_I$  ضریب نسبت جریان اتصال کوتاه به دما،  $\Delta T = T - T_n$  میزان اختلاف دما با دمای استاندارد،  $G$  شدت نور و  $E_g$  فاصله نوارهای انرژی سیلیسیم بر حسب الکترون بر ولت می‌باشند.  $I_{o,n}$  جریان اشباع معکوس می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$I_{o,n} = \frac{I_{sc,n}}{\exp\left(\frac{V_{oc,n}}{aV_t}\right)} \quad (۶-۳)$$

که  $I_{sc,n}$  و  $V_{oc,n}$  به ترتیب جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز در شرایط استاندارد می‌باشند. انتخاب مقدار  $a$  که بین ۱ تا ۱/۵ می‌باشد به سایر پارامترهای مدل وابسته است [۳۴]. انتخاب صحیح آن افزایش دقت مدل را به همراه دارد. همچنین به جای رابطه (۶-۳) استفاده از رابطه زیر که در آن  $K_V$  ضریب نسبت ولتاژ مدار باز به دما می‌باشد دقت مدل را افزایش می‌دهد [۳۴].

<sup>1</sup> thermal voltage

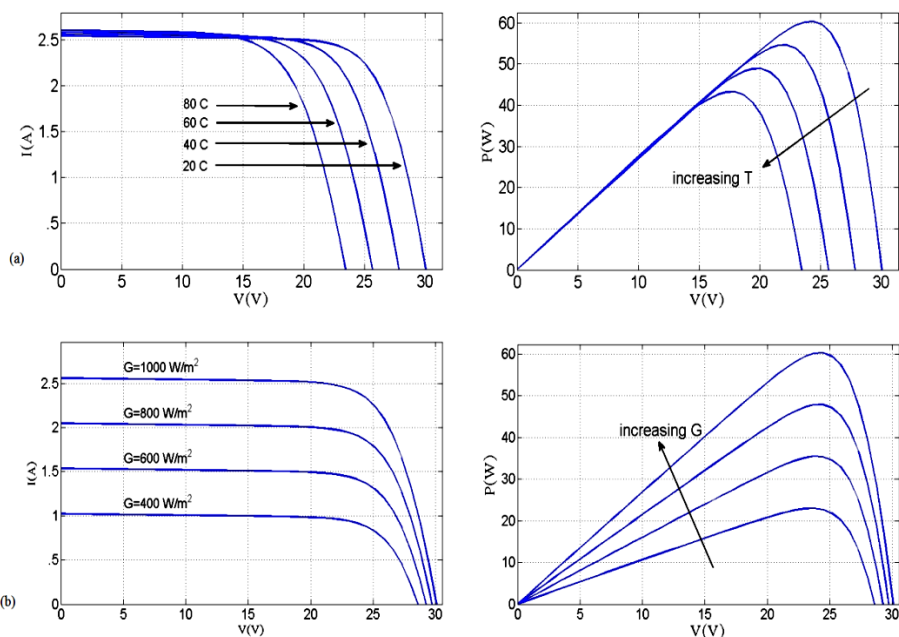
$$I_o = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta T}{\exp(V_{oc,n} + K_V \Delta T) / aV_t - 1} \quad (7-3)$$

ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه از نقاط مهم مشخصه I-V پنل خورشیدی هستند. این نقاط با تغییر شرایط جوی تغییر می‌کنند. با استفاده از روابط (۸-۳) و (۹-۳) که از روابط مدل استخراج می‌شود می‌توان جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز را در شرایط جوی مختلف محاسبه کرد.

$$I_{sc} = (I_{sc,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (8-3)$$

$$V_{oc} = V_{oc,n} + K_V \Delta T \quad (9-3)$$

مشخصه ولتاژ-جریان و ولتاژ-توان را برای مقادیر مختلف شدت نور و دما نشان می‌دهد. همان طور که در شکل دیده می‌شود ولتاژ مدار باز با دما رابطه عکس دارد، شکل ((۲-۳)(a)). یعنی با افزایش دما ولتاژ مدار باز و همچنین ماکزیمم توان کاهش می‌یابند، اما جریان اتصال کوتاه با شدت نور رابطه مستقیم دارد شکل ((۲-۳)(b)) و با افزایش شدت نور جریان اتصال کوتاه و ماکزیمم توان افزایش می‌یابد.



شکل (۲-۳): اثر تغییرات شدت نور و دما در برای منحنی‌های I-V و P-V، (a) تأثیر دما، (b) تأثیر شدت نور

به هر حال توان خروجی در واحدهای فتوولتائیک به شدت نور در سطح سلول خورشیدی و دمای سلول خورشیدی وابسته است. بنابراین، به منظور بهینه سازی بازدهی سیستم انرژی تجدید شدنی ضروری است تا نقطه حداکثر توان در منبع ورودی ردیابی و تعیین مکان شود.

### ۲-۲-۳ مهندسی سیستم فتوولتائیک

پنل خورشیدی تنها جزء یک سیستم فتوولتائیک نیست و اجزاء زیادی برای راه اندازی یک سیستم فتوولتائیک لازم است. بیشتر سیستم‌های فتوولتائیک شامل یک منبعی برای ذخیره انرژی هستند، که این نوع منبع انرژی، انرژی لازم را برای کار در هنگام شب فراهم می‌کند. سلول‌های خورشیدی معمولاً یک جریان مستقیم را تولید می‌کنند و چون بیشتر کاربردها تحت نوع دیگری از جریان (AC) کار می‌کنند در نتیجه ابزاری برای تبدیل این انرژی بایستی وجود داشته باشد.

سیستم‌های کنترل دیگری نیز برای کنترل کردن قسمت‌های مختلف یک سیستم فتوولتاییک لازم است. از جمله این سیستم‌ها می‌توان به ابزارهایی برای نشان دادن وضعیت سیستم اشاره نمود. تمام این ابزارها بایستی به خوبی با هم ترکیب شوند تا یک سیستم ایده‌آل از لحاظ اندازه و مشخصات، بازدهی خوب را فراهم نمایند. اندازه یک سیستم و نیز سیستم‌های ذخیره انرژی به خصوصیات جغرافیایی محل کار بستگی دارد. همچنین نبایستی از پارامترهای نوع کاربرد نیز غافل شد. اما اندازه یک سیستم فتوولتاییک یک معیار اساسی در طراحی سیستم‌های خورشیدی است که بایستی مورد توجه قرار گیرد.

### ۳-۲-۱ ساختار یک سیستم فتوولتاییک

یک سیستم فتوولتاییک شامل یک تعدادی از قسمت‌ها و زیرسیستم‌هایی است که این زیرسیستم‌ها

عبارتند از :

- تولید کننده اثر فتوولتاییک همراه با ابزارهای مکانیکی
- باتری ( زیرسیستم ذخیره انرژی )
- تجهیزات کنترلی و نمایشگرها و وسایل اندازه گیری
- تولید کننده پشتیبانی

اینکه این سیستم‌ها چگونه و بر چه ملاکی انتخاب شوند به پارامترهای زیادی بستگی دارد.

### ۳-۲-۲ انواع سیستم‌های فتوولتاییک

یک سیستم فتوولتاییک تابع شرایطی همچون نوع بار متصل به سیستم ( AC یا DC یا هر دو)

وجود یا عدم وجود تولیدکننده کمکی برق، اتصال یا عدم اتصال به شبکه محلی یا سراسری و چگونگی

ارتباط با آن شبکه (یک طرفه یا دو طرفه) می‌باشد. ذیلاً انواع سیستم‌های فتوولتاییک که در شرایط مختلف از آنها استفاده می‌گردد توضیح داده می‌شود.

### ۳-۲-۳ سیستم مستقل کوچک برق DC

این سیستم وظیفه تأمین انرژی مورد نیاز بارهایی که مصرف‌کننده جریان DC می‌باشند را به عهده دارد. در این سیستم برق تولید شده توسط پنل‌های خورشیدی در بانک باتری ذخیره شده و در موقع لزوم به مصرف بارهای DC می‌رسد.

### ۳-۲-۲ سیستم مستقل AC-DC

این سیستم شبیه سیستم قبلی بوده بجز اینکه دارای اینورتر<sup>۱</sup> یعنی تبدیل‌کننده جریان DC به جریان AC می‌باشد. این سیستم توانایی تغذیه بارهای AC و DC را همزمان دارد. از این سیستم می‌توان به نحو مطلوبی برای تغذیه وسایل برقی خانگی استفاده کرد.

### ۳-۲-۳ سیستم مستقل AC

سیستم مستقل AC برای تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز بارهای AC بکار می‌رود و معمولاً دارای ۱۰ و یا بیشتر پنل خورشیدی و یک و یا بیشتر اینورتر می‌باشد. این سیستم توانایی تأمین قدرت مورد نیاز بارهای بزرگ را دارد.

### ۳-۲-۴ سیستم ترکیبی ژنراتور-پنل خورشیدی

در این سیستم تأمین بخشی از انرژی مورد نیاز بارهای AC به عهده ژنراتور می‌باشد که با سیستم

---

<sup>۱</sup>Inverter

فتوولتاییک ترکیب شده و به آن کمک می‌نماید. برق تولیدی توسط پنل‌های خورشیدی و ژنراتور از طریق شارژ کنترلر در بانک باتری ذخیره شده و در موقع نیاز پس از تبدیل به AC توسط اینورتر به مصرف بارهای AC می‌رسد. زمانی که برق تولیدی توسط پنل‌های خورشیدی در اثر کاهش تابش خورشیدی و یا نبود تابش خورشیدی کمتر از برق درخواستی باشد، ژنراتور باقیمانده برق مورد نیاز را تأمین می‌نماید. برق تولیدی توسط ژنراتور می‌تواند مستقیماً به مصرف بارهای AC برسد و یا در بانک باتری برای استفاده‌های بعدی ذخیره گردد. کلید انتقال وظیفه تغییر خط تغذیه‌کننده بارهای AC را به عهده دارد.

### ۳-۲-۳-۵ سیستم مشترک با شبکه برق عمومی

در این سیستم پنل‌های خورشیدی بخشی یا همه انرژی مورد نیاز بارهای AC را تأمین می‌نماید. این سیستم شبیه سیستم مستقل AC بوده اما با این تفاوت که در مواقع لزوم می‌تواند توان مورد نیاز بارهای AC را از شبکه عمومی (محلی یا سراسری) دریافت نماید. اتصال این سیستم به شبکه برق عمومی، این امکان را فراهم می‌کند که بخش فتوولتاییک این سیستم در سایزهای مختلف ساخته شود. هر گاه برق ذخیره شده در باتری‌ها مصرف شود و باتری‌ها تخلیه گردند، سوئیچ انتقال، خط تغذیه بارهای AC را عوض نموده و انرژی مورد نیاز را از شبکه عمومی دریافت می‌نماید.

### ۳-۲-۳-۶ سیستم متصل به شبکه

در این سیستم برق تولیدی توسط پنل‌های خورشیدی توسط اینورترهای مخصوصی به برق AC تبدیل شده و به مصرف بارهای AC می‌رسد. هرگاه برق تولیدی توسط پنل‌های خورشیدی بیش از نیاز باشد مازاد بر مصرف تحویل شبکه عمومی داده می‌شود و بر عکس هرگاه برق تولیدی توسط پنل‌های خورشیدی کفاف نیاز بارهای AC را ندهد از شبکه عمومی مابقی نیاز بارهای AC تأمین می‌گردد.

## ۳-۲-۴ مزایا و معایب سیستم‌های فتوولتائیک

آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی و پایان پذیر بودن منابع آنها، تلاش و تحقیقات وسیعی را در به‌کارگیری انواع دیگری از انرژی، به خصوص انرژی‌های جدید، موجب شده است. انرژی خورشیدی به دلیل نامحدود بودن، در دسترس بودن و سازگاری با محیط زیست موجب شده است که سیستم‌های فتوولتائیک بیشترین بازار تجاری را در زمینه کاربرد انرژی‌های نو داشته باشد. پاره‌ای از ویژگی‌ها و مزایای سیستم فتوولتائیک که موجب گسترش استفاده از آن در کشورهای مختلف شده است در زیر آمده است.

- بی‌نیازی به سوخت فسیلی
- حفظ محیط زیست و عدم ایجاد آلودگی
- طول عمر مفید بالا (بیش از ۲۰ سال)
- قابلیت اطمینان بالا به دلیل نداشتن بخش‌های متحرک مکانیکی
- پایین بودن احتمال بروز حوادث خطرناک مانند انفجار و آتش سوزی
- سهولت در نصب و راه اندازی و همچنین بی‌نیازی به تجهیزات پیچیده و نیروی انسانی متخصص
- قابلیت تغییر توان با افزایش و کاهش ظرفیت سیستم‌های فتوولتائیک در صورت نیاز با استفاده از افزودن یا کاستن تعداد ماژول‌ها

در مقابل موارد ذکر شده بزرگ‌ترین عیب سیستم‌های فتوولتائیک برای استفاده در توان‌های زیاد، قیمت بالای آن در مقایسه با سایر منابع است. اگر چه با پیشرفت تکنولوژی هزینه سیستم‌های فتوولتائیک روز به روز کاهش می‌یابد، ولی قبل از هر اقدامی تحقیق و بررسی در زمینه صرفه اقتصادی جهت به‌کارگیری هر یک از منابع لازم و ضروری است.



تا کنون این سیستم‌ها در جهان اقتصادی نشده‌اند، اما متخصصان در تلاش برای کاهش قیمت این سیستم‌ها و اقتصادی نمودن آنها می‌باشند. اما در بعضی از مکان‌ها که فاصله از شبکه سراسری برق زیاد بوده و یا امکان سوخت رسانی نمی‌باشد و یا صعب‌العبور است، این سیستم‌ها راهکار اساسی جهت تامین انرژی الکتریکی محسوب می‌شوند.

مطالعات اقتصادی در مورد انواع سیستم‌های تجدید پذیر نشان می‌دهد که بر خلاف هزینه سرمایه گذاری نسبتاً بالا، قیمت برق تمام شده در بیشتر موارد برای نقاط دور از شبکه اقتصادی است.

از آن جمله می‌توان به:

- روستاهای خارج از شبکه
- ماشین‌های حمل مواد غذایی و فاسد شدنی به ویژه در کشورهای آفریقایی که میزان تابش مناسب می‌باشد
- کمپ‌های تفریحی خارج از شبکه سراسری برق
- مراکز مخابراتی و ایستگاه‌های هواشناسی و ... که در مکان‌های صعب‌العبور و فاقد برق می‌باشند

### ۳-۳ تئوری پیشرفته توان لحظه‌ای<sup>۱</sup>

تئوری GTIP تعریفی کلی از توان راکتیو لحظه‌ای در سیستم‌های قدرت سه‌فاز، ارائه می‌دهد که تحت شرایط سینوسی یا غیرسینوسی، متعادل یا نامتعادل در سیستم‌های قدرت سه‌فاز با یا بدون جریان-ها و یا ولتاژهای مولفه صفر برقرار می‌باشد. ولتاژهای لحظه‌ایی  $V_a, V_b, V_c$  و جریان های لحظه‌ایی  $I_a, I_b, I_c$  به عنوان بردارهای فضایی لحظه‌ایی از  $I, V$  بیان می‌شوند که عبارتند از:

---

<sup>1</sup> Advanced Generalized Theory of Instantaneous Power (A-GTIP)

$$I(t) = \begin{bmatrix} I_a(t) \\ I_b(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix}, \quad V(t) = \begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} \quad (10-3)$$

توان اکتیو لحظه‌ای سه‌فاز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P(t) = V(t) \cdot I(t) = V_a(t)I_a(t) + V_b(t)I_b(t) + V_c(t)I_c(t) \quad (11-3)$$

که در آن « $\cdot$ » اختصاص به ضرب داخلی یا ضرب اسکالر بردارها دارد. در این جا ما بردار فضایی

لحظه‌ای  $Q$  را بصورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$Q(t) \triangleq V(t) \times I(t) \quad (12-3)$$

که در آن « $\times$ » ضرب خارجی می‌باشد. بردار  $q$  به عنوان توان راکتیو (غیراکتیو) لحظه‌ای در مدار

سه‌فاز شناخته می‌شود و دامنه آن یا طول بردار  $q$  به عنوان میزان توان راکتیو لحظه‌ای به صورت زیر

محاسبه می‌شود:

$$Q = |Q| = |V(t) \times I(t)| \quad (13-3)$$

که در آن « $|\cdot|$ » اختصاص به دامنه یا طول بردار دارد. معادله ((10-3)) و ((11-3)) را می‌توان با رابطه-

ی((13-3)) بازنویسی کرد:

$$Q(t) = \begin{bmatrix} Q_a(t) \\ Q_b(t) \\ Q_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |V_b(t) & V_c(t)| \\ |I_b(t) & I_c(t)| \\ |V_c(t) & V_a(t)| \\ |V_c(t) & I_a(t)| \\ |V_a(t) & V_b(t)| \\ |I_a(t) & I_b(t)| \end{bmatrix} \quad (14-3)$$

$$Q = |Q(t)| = \sqrt{Q_a^2 + Q_b^2 + Q_c^2} \quad (15-3)$$

بردار جریان اکتیو لحظه‌ای  $I_p$ ، جریان راکتیو لحظه‌ای  $I_q$ ، توان ظاهری لحظه‌ای  $S$ ، وضرب توان

لحظه‌ای  $\lambda$  بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$I_p(t) = \begin{bmatrix} I_{ap}(t) \\ I_{bp}(t) \\ I_{cp}(t) \end{bmatrix} \triangleq \frac{P}{V(t) \cdot V(t)} V(t) \quad (16-3)$$

$$I_q = \begin{bmatrix} I_{aq}(t) \\ I_{bq}(t) \\ I_{cq}(t) \end{bmatrix} \triangleq \frac{Q}{V(t) \cdot V(t)} V(t) \quad (17-3)$$

$$S \stackrel{\text{def}}{=} V \quad (18-3)$$

$$\lambda \stackrel{\text{def}}{=} \frac{P}{S} \quad (19-3)$$

که در آن دامنه یا نرم لحظه‌ای سه‌فاز ولتاژ و جریان بصورت روابط زیر خواهد بود.

$$V = |V(t)| = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2} \quad (20-3)$$

$$I = |I(t)| = \sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2} \quad (21-3)$$

اگر فرض شود ولتاژ ترمینال بار  $V(t)$  در یک سیستم سه-سیمه سه-فاز شامل توالی‌های مثبت و منفی

باشد:

$$V(t) = V^+(t) + V^-(t) \quad (22-3)$$

از روش بهینه می‌توان جریان منبع را بعد از جبران سازی به شکل زیر بازسازی کرد [۱۰]:

$$I_s(t) = \lambda v^+(t) + \lambda v^-(t) = I_s^+(t) + I_s^-(t) \quad (23-3)$$

$$\lambda = \frac{P(t)}{V(t) \cdot V(t)} \quad (24-3)$$

رابطه‌ی بالا نشان می‌دهد مولفه‌های ولتاژهای ترمینال بار، مرتبط با توالی جریان طرف منبع می‌باشند. به بیان دیگر حتی بعد از جبران سازی، ولتاژ توالی منفی بار  $V^-(t)$ ، جریان توالی منفی را در منبع ایجاد می‌کند که باعث تحمیل اغتشاش و نامتعادلی در سمت جریان منبع و کاهش ضریب توان می‌گردد. علاوه بر آن مسئله‌ای که بایستی به آن توجه شود بخش  $V(t) \cdot V(t)$  است که در روابط ((3-16)) ((3-17)) ظاهر می‌شود و بدلیل حضور هارمونیک‌های مراتب متعدد،  $V(t) \cdot V(t)$  خود باعث ایجاد جزء نوسانی شده که با مقدار متوسط جمع می‌شود و باعث ایجاد اغتشاش (هارمونیک‌های مختلف) در جریان منبع می‌گردد. تئوری تکمیلی GTIP (A\_GTIP) جهت برطرف کردن نقایص بیان شده در ارتباط با روابط ارائه شده در تئوری جامع توان‌های لحظه‌ای GTIP راه‌حل‌های زیر را پیشنهاد می‌دهد:

راه حل غلبه بر مولفه توالی منفی جایگزینی  $V(t)$  با  $V^+(t)$  در روابط می‌باشد. بنابراین جریان جدید منبع از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$I_s(t) = \frac{P(t)}{V^+(t) \cdot V^+(t)} V^+(t) \quad (25-3)$$

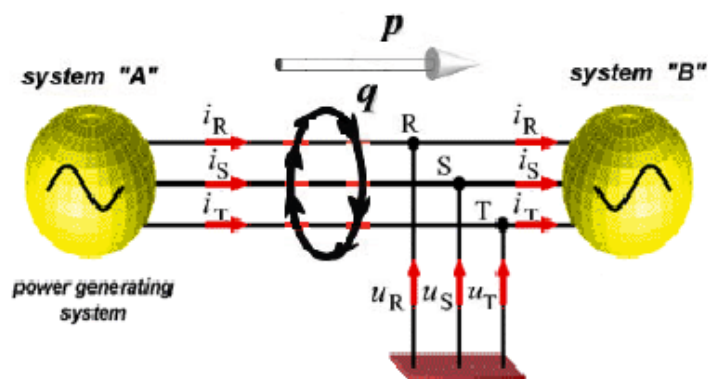
اگرچه مولفه‌ی توالی منفی جریان در رابطه‌ی ((3-24)) حذف می‌شود اما جریان‌های منبع تنها در صورتی که  $V^+(t)$  دارای هیچ مولفه هارمونیک نباشد بصورت کاملاً سینوسی در خواهد آمد. با در نظر گرفتن  $V_1^+(t)$  به عنوان هارمونیک اول  $V^+(t)$ ، جریان منبع پس از جبران سازی بصورت زیر در خواهد

آمد.

$$I_s(t) = \frac{P(t)}{V_1^+(t) \cdot V_1^+(t)} V_1^+(t) \quad (26-3)$$

تحت این شرایط  $V_1^+(t)$  تنها قسمت متوسط را شامل می‌شود و منبع هیچ " توان راکتیوی " را تولید نمی‌کند. کاملاً آشکار است که توان اکتیو تامین شده بوسیله‌ی منبع به اندازه‌ی توان متوسط منتقل شده به بار می‌باشد و بنابراین جریان‌های منبع متعادل و سینوسی خواهند ماند و ضریب توان بصورت واحد در خواهد آمد. باقیمانده توان اکتیو مورد نیاز بار (توان اکتیو نوسانی) بوسیله‌ی جبران‌کننده تامین می‌شود. با استفاده از روابط ((26-3)) جریان‌های مرجع جبران سازی شده با استفاده از GTIP توسعه یافته (A- GTIP) از رابطه‌ی زیر بدست می‌آیند.

شکل (3-3) نشان دهنده‌ی دیاگرام توان تبدالی در سیستم سه فاز سه سیمه می‌باشد. در این شکل، توان مرتبط با Q در دایره‌ای بین فازهای a , b , c نشان داده شده است. توان حقیقی P در صورتیکه مثبت باشد معرف شارش انرژی از سیستم A به سیستم B می‌باشد البته در صورت منفی بودن شارش آنها از سیستم B به سیستم A می‌باشد.



شکل (3-3): توان تبدالی در یک سیستم سه فاز سه سیمه

از آنجا که تئوری تکمیلی GTIP از مولفه‌های مثبت و منفی برای رفع نقایص تئوری‌های قبلی، بهره گرفته ما نیز تمام محاسبات و آنالیز روش را در مختصات مولفه‌های متقارن انجام خواهیم داد. در صورتیکه

فرض شود ولتاژها و جریان‌ها هر فاز بصورت زیر تعریف شده باشند:

$$V_{kn} = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} |V_{kn}| \sin(n\omega t + \varphi_{kn}) \quad (28-3)$$

$$I_{kn} = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} |I_{kn}| \sin(n\omega t + \delta_{kn}) \quad (29-3)$$

ولتاژها و جریان‌های فازهای a و b و c نشان داده در شکل را به فرم مولفه‌های متقارن مثبت و منفی

تبدیل می‌کنیم:

$$\begin{bmatrix} V_n^+ \\ V_n^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & e^{j2\pi/3} & e^{-j2\pi/3} \\ 1 & e^{-j2\pi/3} & e^{j2\pi/3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (30-3)$$

$$\begin{bmatrix} I_n^+ \\ I_n^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & e^{j2\pi/3} & e^{-j2\pi/3} \\ 1 & e^{-j2\pi/3} & e^{j2\pi/3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{an} \\ I_{bn} \\ I_{cn} \end{bmatrix} \quad (31-3)$$

حال مولفه‌های مثبت و منفی انتقالی را با تبدیل پارک به مختصات متقارن  $\alpha\beta$  منقل می‌کنیم.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2} \begin{bmatrix} \sqrt{3} \sin(n\omega_1 t + \varphi_{+n}) & \sqrt{3} \sin(n\omega_1 t + \varphi_{-n}) \\ -\sqrt{3} \cos(n\omega_1 t + \varphi_{+n}) & \sqrt{3} \cos(n\omega_1 t + \varphi_{+n}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n^+ \\ V_n^- \end{bmatrix} \quad (32-3)$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2} \begin{bmatrix} \sqrt{3} \sin(n\omega_1 t + \delta_{+n}) & \sqrt{3} \sin(n\omega_1 t + \delta_{-n}) \\ -\sqrt{3} \cos(n\omega_1 t + \delta_{+n}) & \sqrt{3} \cos(n\omega_1 t + \delta_{+n}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_n^+ \\ I_n^- \end{bmatrix} \quad (33-3)$$

با ولتاژ و جریان‌های انتقالی به مختصات  $\alpha\beta$  توان لحظه‌ای بار بصورت زیر بیان می‌شود و توان اکتیو

لحظه‌ای یا توان حقیقی لحظه‌ای به دست می‌آید.

$$P = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \quad (34-3)$$

با جایگذاری روابط (32-3) و (33-3) در رابطه‌ی (34-3) توان حقیقی خواهیم داشت:

$$\bar{P}_{\alpha\beta} = \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{+n}I_{+n} \cos(\varphi_{+n} - \delta_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{-n}I_{-n} \cos(\varphi_{-n} - \delta_{-n}) \quad (35-3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{\alpha\beta} = & \sum_{m=1(m \neq n)}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{+m}I_{+n} \cos((m-n)\omega t + \varphi_{+n} - \delta_{+n}) \\ & + \sum_{m=1(m \neq n)}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{-m}I_{-n} \cos((m-n)\omega t + \varphi_{-n} - \delta_{-n}) \\ & - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{+m}I_{-n} \cos((m+n)\omega t + \varphi_{+m} + \delta_{-n}) \\ & - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{-m}I_{+n} \cos((m+n)\omega t + \varphi_{-n} + \delta_{+n}) \end{aligned} \quad (36-3)$$

یک سیستم الکتریکی در حالتی که تنها دارای مولفه‌های توالی مثبت ولتاژها و جریان‌ها در فرکانس پایه می‌باشد می‌توان از یکسان بودن توان حقیقی لحظه‌ای  $\tilde{P}$  با توان اکتیو  $P$  مطمئن بود و تنها مولفه‌ی متوسط ( $\bar{P}$ ) وجود خواهد داشت. در هر حالت دیگر، توان اکتیو  $P$  متناسب با مقدار متوسط مولفه‌های توان‌های اکتیو لحظه‌ای  $\tilde{P}$  نمی‌باشد. توان موهومی لحظه‌ای  $Q$  بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q = V_{\alpha}I_{\beta} - V_{\beta}I_{\alpha} \quad (37-3)$$

با جایگذاری روابط ولتاژها و جریان‌ها (32-3) و (33-3) در رابطه‌ی توان موهومی ((37-3) خواهیم

داشت:

$$\bar{Q}_{\alpha\beta} = \sum_{n=1}^{\infty} -3V_{+n}I_{+n} \sin(\varphi_{+n} - \delta_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{-n}I_{-n} \sin(\varphi_{-n} - \delta_{-n}) \quad (38-3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_{\alpha\beta} = & - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{+m}I_{+n} \sin((m-n)\omega t + \varphi_{+m} - \delta_{+n}) \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{-m}I_{-n} \sin((m-n)\omega t + \varphi_{-m} - \delta_{-n}) \\ & - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{+m}I_{-n} \cos((m+n)\omega t + \varphi_{+m} - \delta_{-n}) \\ & - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{-m}I_{+n} \cos((m+n)\omega t + \varphi_{-m} + \delta_{+n}) \end{aligned} \quad (39-3)$$

توان موهومی لحظه‌ایی  $\tilde{Q}$  در سیستم الکتریکی را می‌توان بصورت انرژی تبدیلی بین سیم‌های سه فاز در واحد زمان تعریف کرد. بنابراین، توانی که در هر فاز متناسب با  $Q$  جریان می‌یابد ارتباطی با انرژی جاری شده از منبع به بار و یا بالعکس ندارد. متناسب با این دو توان لحظه‌ای، مولفه‌های جریان اکتیو لحظه‌ای  $I_p$  اینگونه تعریف می‌شود:

$$I_{\alpha(\bar{p}+\tilde{p})} = \frac{V_{\alpha}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} (\bar{P} + \tilde{P}) \quad (40-3)$$

$$I_{\beta(\bar{p}+\tilde{p})} = \frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} (\bar{P} + \tilde{P}) \quad (41-3)$$

جریان راکتیو لحظه‌ای  $I_q$  اینگونه تعریف می‌شود.

$$I_{\alpha(\bar{Q}+\tilde{Q})} = \frac{-V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} (\bar{Q} + \tilde{Q}) \quad (42-3)$$

$$i_{\beta(\bar{Q}+\tilde{Q})} = \frac{u_{\alpha}}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} (\bar{Q} + \tilde{Q}) \quad (43-3)$$

جریان‌های اکتیو و راکتیو لحظه‌ای خطوط تغذیه در مختصات مرجع  $\beta, \alpha$  را می‌توان با تبدیل



معکوس کلارک، برای این جریان‌ها محاسبه کرد

$$C^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & 3/\sqrt{2} \\ -1/2 & -3/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (44-3)$$

$$\begin{bmatrix} I_{ap} \\ I_{bp} \\ I_{cp} \end{bmatrix} = C^{-1} \begin{bmatrix} I_{\alpha(\bar{p}+\bar{p})} \\ I_{\beta(\bar{p}+\bar{p})} \end{bmatrix} \quad (45-3)$$

$$\begin{bmatrix} I_{aQ} \\ I_{bQ} \\ I_{cQ} \end{bmatrix} = C^{-1} \begin{bmatrix} I_{\alpha(\bar{Q}+\bar{Q})} \\ I_{\beta(\bar{Q}+\bar{Q})} \end{bmatrix} \quad (46-3)$$

ایده‌ی جریان‌های اکتیو و راکتیو دارای مفاهیمی است که از سال‌ها قبل در مهندسی برق پایه‌گذاری شده است. جریان اکتیو در سال ۱۹۳۲ توسط فریز اینگونه تعریف می‌گردد، اگر بار در ولتاژ  $V(t)$ ، به توان اکتیو  $P$  نیاز داشته باشد و در صورتیکه دارای همان شکل موج ولتاژ تغذیه باشد حداقل جریان بار وجود خواهد داشت. این جریان بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_a(t) = \frac{P}{V^2} V(t) = G_e V(t) \quad (47-3)$$

که در آن  $V$  مقدار RMS ولتاژ تغذیه را نشان می‌دهد. برای سیستم‌های سه فاز سه سیمه، تعریف فریز به فرم زیر بسط داده می‌شود.

$$I_a(t) = \begin{bmatrix} I_{aa} \\ I_{ba} \\ I_{ca} \end{bmatrix} = \frac{P}{\|U\|^2} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = G_e V(t) \quad (48-3)$$

که در آن  $\|V\|$  مقدار RMS سه فاز ولتاژ تغذیه می‌باشد

$$\|V\| = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2} \quad (49-3)$$

جریان راکتیو مولفه‌ی جریان تغذیه دارای تأخیر  $\pi/2$  نسبت به ولتاژ تغذیه می‌باشد و در سیستم‌های

تک فاز با ولتاژ و جریان سینوسی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_r(t) = \frac{-Q}{V^2} \frac{d}{d(\omega t)} V(t) = B_e \frac{d}{d(\omega t)} V(t) \quad (50-3)$$

برای سیستم‌های سه-سیمه‌ی سه-فاز این تعریف بصورت زیر بسط داده می‌شود:

$$I_r(t) = \frac{-Q}{\|V\|^2} \frac{d}{d(\omega t)} V(t) = B_e \frac{d}{d(\omega t)} V(t) \quad (51-3)$$

هر دو جریان‌های اکتیو و راکتیو دارای معنای فیزیکی گویایی می‌باشند آنها مرتبط با حضور توان‌های

اکتیو و راکتیو  $P$  و  $Q$  بوده و متناسب با کندوکتانس معادل  $G_e$  بار و سوسپیتانس معادل  $B_e$  می‌باشند.

تعبیر جریان اکتیو برای طراحی جبران‌ساز دارای اهمیت می‌باشد. زیرا حداقل جریان تغذیه مورد نیاز بار

است که مرتبط با توان اکتیو  $P$  بوده و تنها جریانی است که بایستی در خطوط تغذیه بار پس از

جبران‌سازی کامل جریان‌های غیر مفید وجود داشته باشد.

# فصل چهارم: الگوریتم‌های کنترلی

## سیستم فتوولتائیک

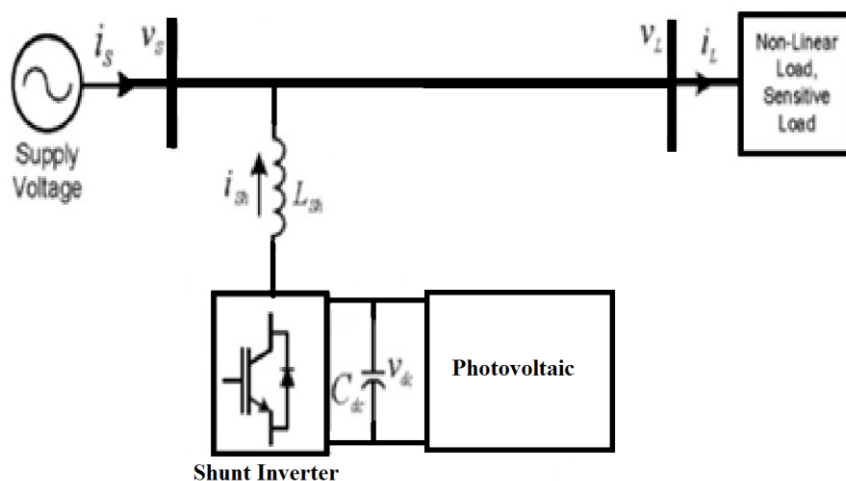
## ۴-۱ مقدمه

اتصال یک سیستم تولید الکتریکی مبتنی بر تبدیل انرژی خورشیدی به اجزای یک ریز شبکه و همچنین بهره برداری شبکه عمومی از این مجموعه نیاز به وجود ادوات الکترونیک قدرت را ایجاب می‌کند. این ادوات بر اساس تبدیلاتی که انجام می‌دهند، شرایط را برای همچنین اتصالی فراهم می‌آورند. از سوی دیگر مسائلی که به سبب وقوع انواع خطاها در شبکه ایجاد می‌شود، مشکلات کیفیت توانی را برای بارهای حساس در میکروگرید و حتی بارهای موجود در شبکه سراسری به وجود خواهد آورد. از انواع این خطاها می‌توان به افتادگی و بالازدگی ولتاژ، قطع و اتصال کوتاه فازهای شبکه و همچنین وجود اعوجاجات ولتاژ و جریانی در سیستم اشاره کرد. با به کارگیری ابزارهایی وضعیت سیستم در شرایط مختلف بررسی و در صورت امکان روشی برای کنترل این خطاها ارائه می‌شود. در این بخش به ارائه الگوریتم‌های کنترلی مربوط به اتصال این سیستم به ریز شبکه یا میکروگرید پرداخته می‌شود.

## ۴-۲ جبران ساز موازی

سیستم‌های فتوولتاییک به جهت تغییر شرایط محیطی که از جمله آنها می‌توان به تغییر در وضعیت تابش نور خورشید و همچنین افزایش یا کاهش دمای محیط اشاره کرد، در توان‌های مختلفی مورد بهره‌برداری واقع می‌شود. این تغییرات توان خروجی قابلیت اطمینان سیستم را کاهش می‌دهد. برای داشتن میزان پایداری از توان خروجی این سیستم‌ها، از تجهیزات ذخیره ساز انرژی مانند بانک باطری‌ها استفاده می‌شود. مجموعه ذخیره کننده، قابلیت جبران انرژی در مواقع کاهش سطح توان تولیدی در سیستم فتوولتاییک را دارا است. از طرف دیگر استفاده از تجهیزات ذخیره ساز در بهره‌برداری از سیستم فتوولتاییک به واسطه قیمت بالای آن‌ها، هزینه راه‌اندازی این واحدها را افزایش می‌دهد.

بهره‌برداری از سیستم‌های فتوولتائیک معمولاً در شرایط اتصال به شبکه صورت می‌گیرد. این امر نیاز به ادوات ذخیره‌ساز انرژی را برطرف کرده و همچنین با تزریق توان به شبکه سراسری برق در مواقع پیک بار، سطح قابلیت اطمینان شبکه را افزایش می‌دهد. برای بالا بردن سطح کیفیت توان مبادله شده و جبران خطاهای واقع شده که از سمت شبکه به سیستم فتوولتائیک اعمال می‌شود و همچنین اصلاح وضعیت ولتاژ و جریان، در اتصال به شبکه این سیستم‌ها، از جبران کننده استفاده می‌شود. شکل (۱-۴) اتصال به شبکه یک سیستم فتوولتائیک همراه با جبران کننده موازی آن در حضور یک بار غیرخطی را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۴): میکروگرید متصل به شبکه با اعمال جبران ساز موازی در حضور بار غیر خطی

شکل (۱-۴) یک میکروگرید با جبران ساز موازی آن، در حالی که یک بار غیر خطی را تغذیه می‌کند نمایش می‌دهد. بار غیر خطی در این سیستم با ایجاد هارمونیک، شکل موج ولتاژ و جریان را در نقطه اتصال به شبکه دچار اعوجاج خواهد کرد

## ۱-۲-۴ جبران ساز موازی

از جبران ساز موازی برای جبران سازی هارمونیک‌های جریان بار و انتقال توان از سیستم فتوولتاییک به بار استفاده می‌شود که منجر به بدست آمدن ولتاژ سینوسی کامل می‌گردد. از تئوری A-GTIP برای محاسبه سیگنال‌های مرجع جبران سازهای موازی استفاده می‌شود. فرض می‌کنیم که  $V(t)$  ولتاژ بار باشد و شامل مولفه‌های مثبت منفی و صفر نیز باشد. جریان‌های سمت منبع را می‌توان با استفاده از تئوری OS به صورت زیر بدست آورد:

$$V(t) = V^+(t) + V^-(t) + V^0(t) \quad (۱-۴)$$

$$I_s(t) = I_s^+(t) + I_s^-(t) + I_s^0(t) \quad (۲-۴)$$

$$I_s^+(t) = \lambda \cdot V^+(t) \quad (۳-۴)$$

$$I_s^-(t) = \lambda \cdot V^-(t) \quad (۴-۴)$$

$$I_s^0(t) = \lambda \cdot V^0(t) \quad (۵-۴)$$

$$\lambda = \frac{\bar{P}(t)}{V(t) \cdot V(t)} \quad (۶-۴)$$

$$I_s(t) = \frac{\bar{P}(t)}{V(t) \cdot V(t)} V(t) \quad (۷-۴)$$

$$I_c(t) = I_{Load}(t) - \frac{\bar{P}(t)}{V(t) \cdot V(t)} V(t) \quad (۸-۴)$$

که در آن  $I_s(t)$  جریان شبکه،  $I_c(t)$  جریان جبران کننده،  $I_{Load}(t)$  جریان باری است که باید جبران شود،  $\lambda$  ضریب توان لحظه ای و  $P_g(t)$  توان لحظه ای است. با توجه به اینکه  $V(t)$  غیر سینوسی است، در

(رابطه ۳-۵۳) به صورت منبع اعوجاج عمل می کند. جبران ساز موازی نیز جریان اعوجاجی تزریق می کند. لذا جواب منتج از الگوریتم GTIP در شرایط عدم تعادل و یا ولتاژ غیر سینوسی ترمینال بار مورد قبول نمی باشد. تئوری A-GTIP برای این مشکل راه حل های زیر را پیشنهاد می کند:

پیشنهاد اول برای فائق آمدن بر مشکل عدم تقارن، جایگزینی  $V(t)$  با  $V^+(t)$  در رابطه (۴-۲) تا (۴-۸) است. با این جایگزینی این نتایج حاصل می شود: ۱- مقدار دقیق توالی مثبت جریان تامین شده توسط شبکه محاسبه می گردد.  $I_g(t)$  - ۲ توالی های منفی و صفر جریان بار که باید توسط جبران ساز موازی تامین گردد محاسبه می گردند ( $I_c(t)$ ). با این وصف، جریان های جدید منبع و جبران ساز موازی به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$I_g(t) = \frac{\bar{P}_g(t)}{V^+(t).V^+(t)} V^+(t) \quad (۹-۴)$$

$$I_c(t) = I_{Load}(t) - \frac{\bar{P}_g(t)}{V^+(t).V^+(t)} V^+(t) \quad (۱۰-۴)$$

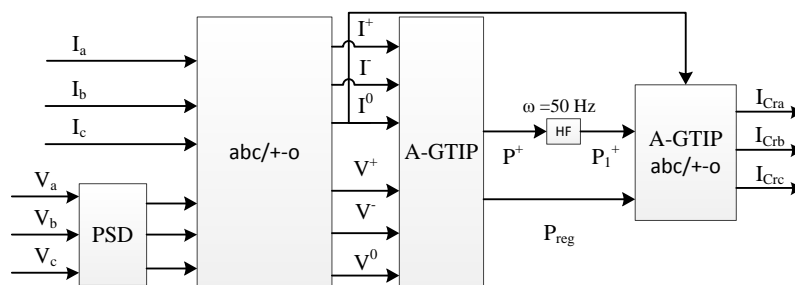
واضح است که اگر  $V^+(t)$  کاملا سینوسی و عاری از هرگونه هارمونیک باشد، جریان سمت منبع کاملا سینوسی خواهد ماند، اما اگر  $V^+(t)$  غیر سینوسی باشد به عنوان یک منبع اعوجاج عمل خواهد کرد. بدین ترتیب جریان تزریق شده توسط جبران ساز موازی طبق رابطه زیر منجر به جریان سمت منبع سینوسی در یک سیستم چهار سیمه می گردد.

$$I_g(t) = \frac{\bar{P}_g(t)}{V_1^+(t) + V_1^+(t)} V_1^+(t) \quad (۱۱-۴۴)$$

$$I_c(t) = I_{Load}(t) - \frac{\bar{P}(t)}{V_1^+(t) + V_1^+(t)} V_1^+(t) \quad (۱۲-۴)$$

که در آن  $V_1^+(t)$  مولفه ی اصلی  $V^+(t)$  می باشد. بلوک دیاگرام کنترل کننده جبران ساز با استفاده از

تئوری A-GTIP در شکل (۲-۴) نشان داده شده است. بلوک PSD<sup>۱</sup> در آن وظیفه جلوگیری از تشدید را دارد. بلوک‌های دیگر نیز تبدیل قاب مرجع، روابط مربوط به A-GTIP و معکوس تبدیل قاب مرجع می باشد [۳۵].



شکل (۲-۴): الگوریتم جریان سازی پیشنهادی بر مبنای A-GTIP

## ۳-۴ ردیابی حداکثر توان

در مقاله [۳۶] نوع جدید از روش‌های ردیابی حداکثر توان ارائه شده است. این الگوریتم که به الگوریتم هیبرید موسوم است دارای دو مرحله می‌باشد. مرحله اول محاسبه نقطه کار و مرحله دوم تنظیم دقیق نقطه کار بدست آمده است. در اینجا، مرحله اول یعنی محاسبه نقطه کار، با استفاده از ولتاژ مدار باز (۸-۳) و (۹-۳) ولتاژ حداکثر توان  $V_{MPP}$  تخمین زده می‌شود. در مرحله دوم، مقدار دقیق ولتاژ حداکثر توان با استفاده از روش کلاسیک اغتشاش و مشاهده<sup>۲</sup> و با دامنه و فرکانس ثابت و کوچک اغتشاش دنبال می‌شود. در این قسمت، روش مقاومی<sup>۳</sup> برای دنبال کردن نقطه توان حداکثر ارائه می‌شود. این روش نیز جزء روش‌های هیبرید طبقه بندی می‌شود. در این روش به جای محاسبه ولتاژ حداکثر توان، جریان حداکثر توان ( $I_{MPP}$ ) محاسبه می‌شود که این امر باعث افزایش بهره وری و دقت می‌گردد [۳۷]. در این روش علاوه بر ضرایب  $V_{OCN}$ ,  $K_V$ ,  $K_I$  و غیره که در روش قبلی مقادیر لازم و اولیه بودند و توسط سازنده

<sup>۱</sup> Power Synchronous Detection

<sup>۲</sup> Perturbation and Observation (P&O)

<sup>۳</sup> Robust



پنل خورشیدی داده می‌شدند، مقادیر  $a$ ،  $R_S$  و  $R_P$  نیز مقادیر لازم و اولیه هستند. این مقادیر با جایگذاری سه نقطه  $(0, I_{SC,N})$ ،  $(V_{OC,N}, 0)$  و  $(V_{MPP,N}, I_{MPP,N})$  مربوط به پنل در شرایط استاندارد ( $G_n = 1000 W m^{-2}$ ,  $T_n = 25 \text{ }^\circ C$ ) در معادله (۳-۳) و حل مجموعه معادلات زیر، بدست می‌آید.

$$\begin{cases} I_{SC,n} = I_{PV,n} - I_{O,n} \left( \exp\left(\frac{I_{SC,n} R_S}{a V_{T,n}}\right) - 1 \right) - \frac{I_{SC,n} R_S}{R_P} \\ 0 = I_{PV,n} - I_{O,n} \left( \exp\left(\frac{V_{OC,n}}{a V_{T,n}}\right) - 1 \right) - \frac{V_{OC,n}}{R_P} \\ I_{MPP,n} = I_{PV,n} - I_{O,n} \left( \exp\left(\frac{I_{MPP,n} R_S}{a V_{T,n}}\right) - 1 \right) - \frac{I_{MPP,n} R_S}{R_P} \end{cases} \quad (13-4)$$

مقادیر لحظه ای ولتاژ، جریان و دمای پنل خورشیدی اندازه گیری شده و  $I_{PV}$  تنها متغیر وابسته به

شدت نور و همچنین دما است که با استفاده از روابط (۴-۱۴) محاسبه می‌گردد. در این معادله  $V_T$  و  $I_O$

که به دما وابسته هستند توسط معادله  $V_t = N_s K T / q$  و معادله (۳-۷) به روز می‌شوند.

$$I_{PV} = I + I_O \left( \exp\left(\frac{V + I R_S}{a V_T}\right) - 1 \right) + \frac{V + I R_S}{R_P} \quad (14-4)$$

با محاسبه  $I_{PV}$  معادله (۴-۱۵) مقدار  $I_{SC}$  را می‌دهد. در این معادله که به صورت بازگشتی حل می‌-

شود، در هر مرحله  $I_{SC}$  مرحله قبل جایگزین می‌شود و این پروسه  $m$  بار تکرار می‌گردد. وقتی که  $I_{SC}$

دیگر تغییر نکند،  $I_{SC}$  بدست آمده است. از آنجا که تخمین اولیه به مقدار واقعی نزدیک می‌باشد، تعداد

دفعات تکرار معمولاً عدد کوچکی است.

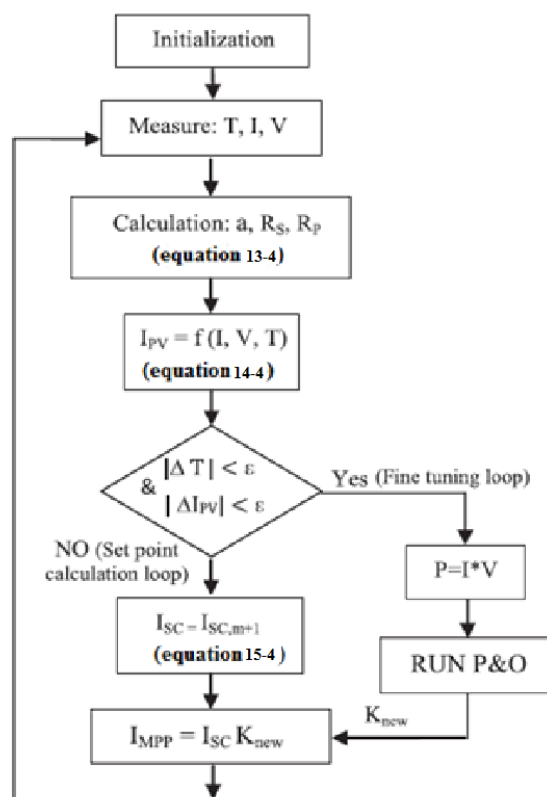
$$I_{SC,1} = I_{PV} \quad (15-4)$$

$$I_{SC,m+1} = I_{PV} - I_O \left( \exp\left(\frac{I_{SC,m} R_S}{a V_T}\right) - 1 \right) - \frac{I_{SC,m} R_S}{R_P}$$

$$m = 1, 2, \dots, m \quad , \quad I_{SC} = I_{SC,m+1}$$

در این روش، حلقه تنظیم دقیق، برای اصلاح محاسبات  $I_{SC}$  می‌باشد که در اثر خطا در اندازه گیری و

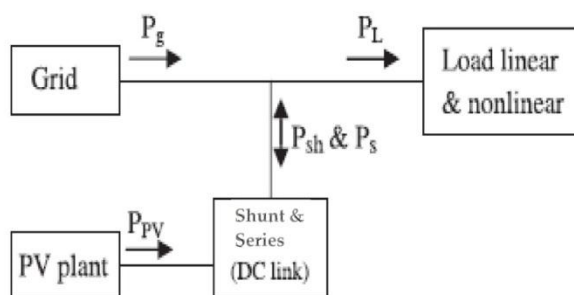
غیر دقیق بودن مدل‌سازی پنل خورشیدی رخ می‌دهد. در این روش، اگر دما یا  $I_{PV}$  تغییرات کوچکی کنند، حلقه تنظیم دقیق می‌تواند خروجی توان را باز به حالت بیشینه برساند. با توجه به اینکه  $I_{PV}$  با تغییر شدت نور تغییر می‌کند، می‌توان گفت که حلقه تنظیم دقیق در شرایط ثابت بودن شرایط جوی عمل می‌کند. از سوی دیگر با تغییر سریع شرایط جوی، حلقه تنظیم دقیق اجرا نمی‌شود لذا نیازی نیست که دامنه تغییرات روش P&O بزرگ باشد. بزرگ بودن دامنه تغییرات روش P&O در حالت ماندگار منجر به تغییرات توان حول نقطه بهینه در خروجی پنل خورشیدی می‌شود. فلوجارت الگوریتم کنترلی ارائه شده در شکل (۳-۴) آمده است.



شکل (۳-۴): الگوریتم کلی دنبال کردن نقطه حداکثر توان

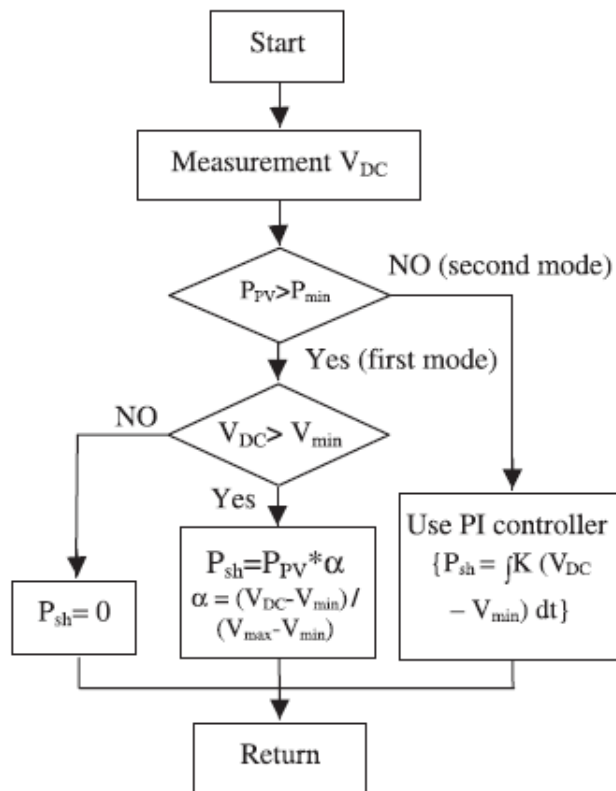
## ۴-۴ کنترل ولتاژ باس DC

شکل (۴-۴) شماتیک شارش توان در شبکه را نشان می‌دهد. در این سیستم توان اعمالی به بار شامل مجموع توان رسیده از شبکه عمومی و توان واحد فتوولتاییک است که عملیات انتقال توان فتوولتاییک به بار توسط جبران ساز صورت می‌پذیرد. سیستم جبران ساز به عنوان یک بار متغیر عمل می‌کند که توان مصرفی آن با توان تولید پنل خورشیدی و همچنین ولتاژ باس DC تغییر می‌کند.



شکل (۴-۴): شماتیک شارش توان در سیستم

برای عملکرد مناسب سیستم متشکل از پنل خورشیدی و جبران ساز موازی لازم است که ولتاژ باس DC کنترل شود. این الگوریتم شامل دو حالت است. حالت اول زمانی است که پنل خورشیدی توان تولید می‌کند ( $P_{pv} > P_{min}$ ). توان تولیدی توسط جبران ساز به شبکه منتقل می‌شود. حالت دوم زمانی است که در آن توان پنل خورشیدی از یک آستانه ( $P_{min}$ ) کمتر باشد. در این حالت، ولتاژ باس DC نیز باید از  $V_{min}$  بیشتر باشد که جبران ساز بتواند عملکرد مناسبی داشته باشد. فلوچارت الگوریتم کنترلی باس DC در شکل (۴-۵) آمده است.



شکل (۵-۴): الگوریتم کلی کنترل ولتاژ باس DC

الگوریتم کنترلی همانطور که از شکل (۵-۴) فهمیده می‌شود، در حالت اول عملکرد سیستم، توان تولیدی پنل خورشیدی توسط مبدل boost به باس DC منتقل می‌شود. زمانی که ولتاژ باس DC از ولتاژ مینیمم کمتر باشد، توان تولیدی پنل خورشیدی تماماً به باس DC داده خواهد شد و توان منتقل شده از باس DC به شبکه صفر خواهد بود. از این توان داده شده به باس DC برای شارژ خازن به منظور نگهداشتن ولتاژ باس DC در محدوده مجاز استفاده می‌شود. در حالتی که ولتاژ باس DC از ولتاژ مینیمم بیشتر باشد، تنها جزئی از توان تولیدی پنل خورشیدی صرف شارژ خازن باس DC می‌شود و باقی توان توسط جبران ساز موازی به شبکه منتقل می‌شود. زمانی که ولتاژ باس DC به حداکثر مجاز خود می‌رسد، تمامی توان تولیدی پنل خورشیدی به شبکه انتقال می‌یابد. در حال مابین یعنی حالتی که ولتاژ باس DC بین حداقل و حداکثر مجاز خود باشد، رابطه‌ای خطی بین توان استفاده شده برای شارژ خازن باس DC و

( $V_{DC-max}-V_{DC-min}$ ) برقرار شده است.

داریم ( $P_{sh}=\alpha P_{PV}$ ) و ( $\alpha=(V_{DC}-V_{DC-min})/(V_{DC-max}-V_{dc})$ ). پس مقداری از توان مورد نیاز در مواقعی

که ولتاژ باس DC از ولتاژ مینیمم بیشتر است توسط PV تامین می‌شود. در این حالت بنا بر قانون جریان

کیرشهف، همانطور که در معادله (۴-۱۷) نشان داده شده است، جریان بار ( $I_{Load}$ ) برابر مجموع جریان

شبکه ( $I_{grid}$ ) و جریان جبران ساز موازی ( $I_{sh}$ ) است که  $I_{sh}$  خود برابر جریان پنل خورشیدی ( $I_{PV}$ ) و

جریان جبران سازی سری ( $I_c$ ) می‌باشد. پس معادله (۴-۱۶) و (۴-۱۹) برای کنترل توان اکتیو منتقل

شده از PV به شبکه به معادله (۴-۲۰) و (۴-۲۱) تبدیل می‌شود.

$$I_g(t) = \frac{\bar{P}_g(t)}{V_1^+(t) + V_1^+(t)} V_1^+(t) \quad (۴-۱۶)$$

$$I_{sh} = I_{pv} + I_c \quad (۴-۱۷)$$

$$P_g(t) = P_{Load}(t) - P_{sh}(t) \quad (۴-۱۸)$$

$$I_{pv} = \frac{\bar{P}_{sh}(t)}{V_1^+(t) \cdot V_1^+(t)} V_1^+(t) \quad (۴-۱۹)$$

$$I_g(t) = \frac{\bar{P}_g(t)}{V_1^+(t) \cdot V_1^+(t)} V_1^+(t) \quad (۴-۲۰)$$

$$I_c(t) = I_{Load}(t) - \frac{\bar{P}_g(t) + \bar{P}_{sh}(t)}{V_1^+(t) \cdot V_1^+(t)} V_1^+(t) \quad (۴-۲۱)$$

بنا بر معادله (۴-۲۱) در حالت فوق، علاوه بر فراهم کردن تمام مولفه های صفر و منفی جریان بار

غیر خطی، جبران کننده‌ها بخشی از جریان مولفه مثبت بار را نیز فراهم می‌کند که باعث پایین آمدن

جریان منبع می‌شود.



فصل پنجم: شبیه سازی واحد

فتوولتاییک متصل به شبکه و

سیستم کنترلی آن

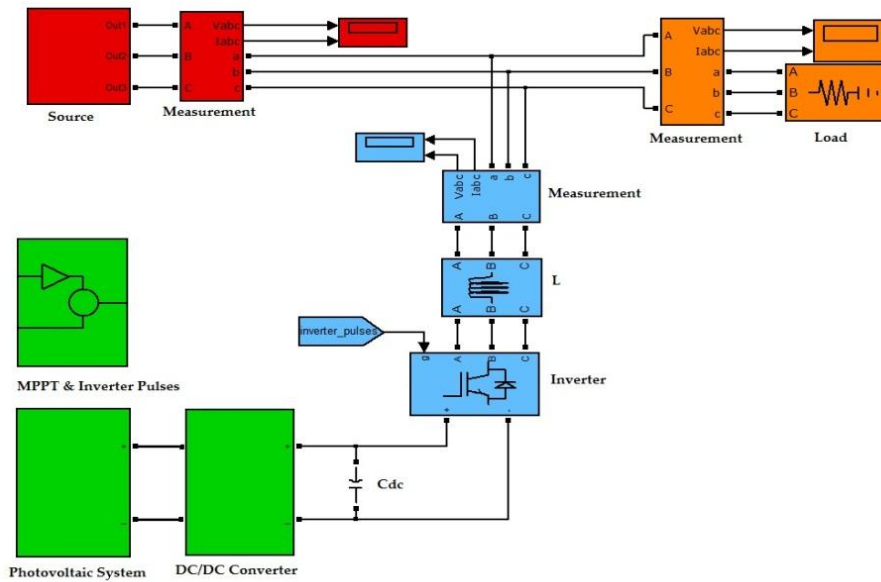
## ۱-۵ مقدمه

ساختار و مدل واحد تولید فتوولتاییک و همچنین تئوری‌های مورد استفاده جهت طراحی سیستم کنترلی جبران ساز آن در بخش‌های قبل توضیح داده شد. در این فصل ابتدا با شبیه سازی واحد تولید توان خورشیدی متصل به شبکه در شرایط خطا و در حالتی که از جبران ساز استفاده نمی‌شود، پرداخته خواهد شد، و تحلیل اثرات خطای ایجاد می‌شود. سپس با اعمال جبران ساز به این سیستم در حضور بار غیرخطی، وضعیت پارامترهای آن در شرایط خطای شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲-۵ شبیه سازی واحد تولید توان خورشیدی متصل به شبکه

شکل (۱-۵) شماتیک شبیه سازی واحد تولید توان نیروگاه خورشیدی متصل به شبکه در حضور دو نوع بار خطی و غیر خطی در فضای Matlab/Simulink را نشان می‌دهد. این نیروگاه با استفاده از یک مبدل بوست به یک باس DC متصل می‌باشد. ولتاژ باس DC با به کارگیری یک اینورتر که سیگنال‌های اعمالی آن توسط یک واحد تولید پالس ایجاد می‌شود، به ولتاژ AC تبدیل می‌گردد. برای ردیابی نقطه حداکثر توان، روش معرفی شده پیاده سازی شده است. نتایج در دو بخش آورده خواهند شد. در بخش اول، عملکرد سیستم MPPT ارائه شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت و در بخش دوم وضعیت سیستم در شرایط نرمال و خطای سمت شبکه با حضور بار خطی و غیرخطی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.





شکل (۱-۵): مدل سیستم فتوولتاییک و اتصال آن به سیستم میکرو گرید

این سیستم در محیط Matlab/Simulink شبیه سازی شده است. این سیستم شامل یک منبع ولتاژ AC با ولتاژ ۳۹۲V و ۵۰ Hz است. توان نامی بار غیرخطی ۷۵KVA می باشد و حداکثر توان تولیدی پنل خورشید است. مقادیر پارامترهای شبیه سازی در جدول (۱-۵) آورده شده است.

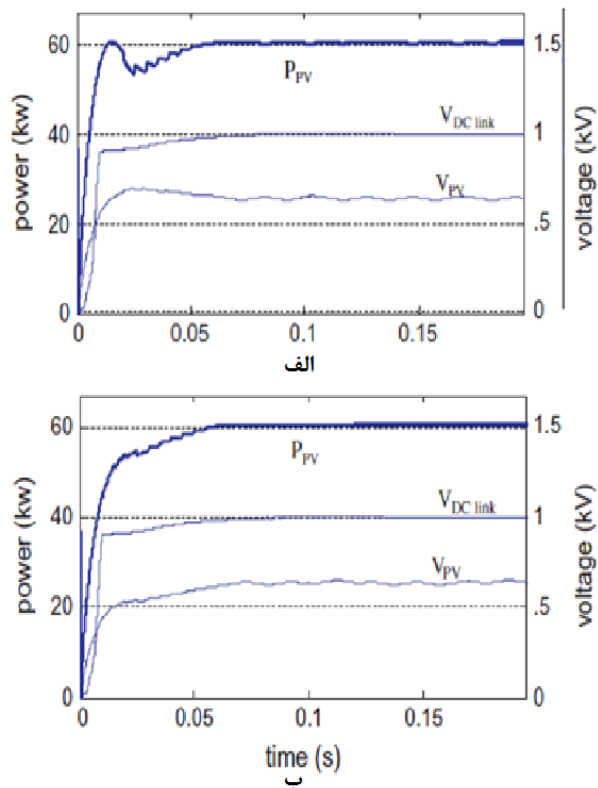
جدول (۱-۵): مقادیر پارامترهای شبیه سازی

پارامتر شبیه سازی	مقدار	پارامتر شبیه سازی	مقدار
$V_{L-L}$ ولتاژ خط به خط شبکه	۳۹۲V	G شدت نور	$1000 \text{ W/m}^2$
F فرکانس کاری شبکه	۵۰ Hz	T دمای محیط	۲۰ C
$P_{Load}$ توان نامی بار خطی	۷۵KVA	Kp برای PI جبران ساز موازی	۳۰۰
$P_{Load}$ توان نامی بار غیرخطی	۷۵KVA	Ki برای PI جبران ساز موازی	۳۵
$P_{PV,Max}$ حداکثر توان فتوولتاییک	۶۰ KW	Kp برای PI فتوولتاییک	۲
خازن باس DC	۸.۸mF	Ki برای PI فتوولتاییک	۱۱

## ۵-۲-۱ شبیه سازی و بررسی سیستم MPPT

نیروگاه خورشیدی از اتصال سری و موازی تعداد زیادی از پنل‌های خورشیدی تشکیل شده است. این نیروگاه توسط یک مبدل بوست به باس DC متصل می‌شود و توان تولیدی از این طریق به باس DC انتقال می‌یابد. از باس DC، انرژی تولیدی نیروگاه خورشیدی توسط جبران ساز موازی، به شبکه AC منتقل و به بار غیر خطی با TDH بیش از ۴۰٪ می‌رسد. فرکانس کاری ۵۰ هرتز و ولتاژ فاز شبکه ۲۳۰ ولت می‌باشد.

شکل (۵-۲) ولتاژ و توان خروجی برای روش‌های MPPT ارائه شده در [۱۴] و روش ردیابی حداکثر توان پیشنهادی را نشان می‌دهد. در هر دو روش، تخمینی از نقطه کار بهینه برای قرار دادن نقطه کار در نزدیکی نقطه حداکثر توان استفاده می‌شود. سپس با استفاده از حلقه تنظیم دقیق، نقطه کار به نقطه حداکثر توان منتقل می‌شود. در [۱۴]، عمل تخمین با استفاده از ولتاژ حداکثر توان انجام می‌شود. در این روش، ولتاژ حداکثر توان بیشتر از ولتاژ واقعی تخمین زده می‌شود. به همین دلیل وقتی ولتاژ باس DC از ۸۵۰ ولت به ۱۰۰۰ ولت می‌رسد، به همین ترتیب نقطه کار نیز از مقدار حداکثر توان منحرف شده و پس از چند میلی ثانیه به مقدار نهایی می‌رسد. شایان ذکر است که شیب نمودار P-V در نقاط بالاتر از ولتاژ ماکزیمم بسیار بیشتر از شیب نقاط ولتاژ پایین تر از حداکثر توان است. بدین ترتیب تغییرات جزئی در ولتاژ منجر به تغییرات زیادی در توان خروجی می‌شود. با توجه به شکل، روش ارائه شده به صورت هموارتری توان خروجی را به نقطه حداکثر می‌رساند و نوسانات توان نیز در حالت ماندگار بسیار کمتر است.



شکل (۲-۵): توان نیروگاه خورشیدی ( $P_{PV}$ )، ولتاژ باس DC ( $V_{DC\ link}$ )، ولتاژ پنل خورشیدی ( $V_{PV}$ ) الف) روش [۱۴] (ب) روش ارائه شده

## ۲-۲-۵ شبیه سازی و بررسی واحد تولید توان خورشیدی بدون

### کاربرد جبران ساز موازی

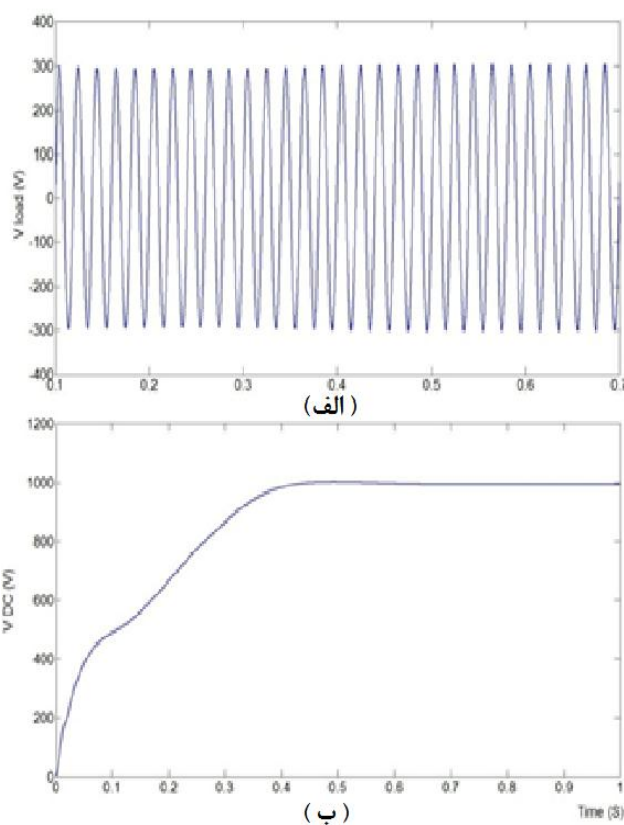
در این قسمت با شبیه سازی مدل مذکور در محیط Matlab/Simulink و با در نظر گرفتن بار خطی به مقدار ۷۵ KVA شکل موجهای ولتاژ و جریان برای نقاط مختلف سیستم همانطور که در ادامه خواهد آمد، نمایش داده می شود.

## ۳-۲-۵. بررسی سیستم در شرایط نرمال شبکه با اعمال بار

### خطی

شکل موج‌های ولتاژ سیستم در شرایط نرمال شبکه و در حضور یک بار خطی، در شکل ۳-۵ نشان

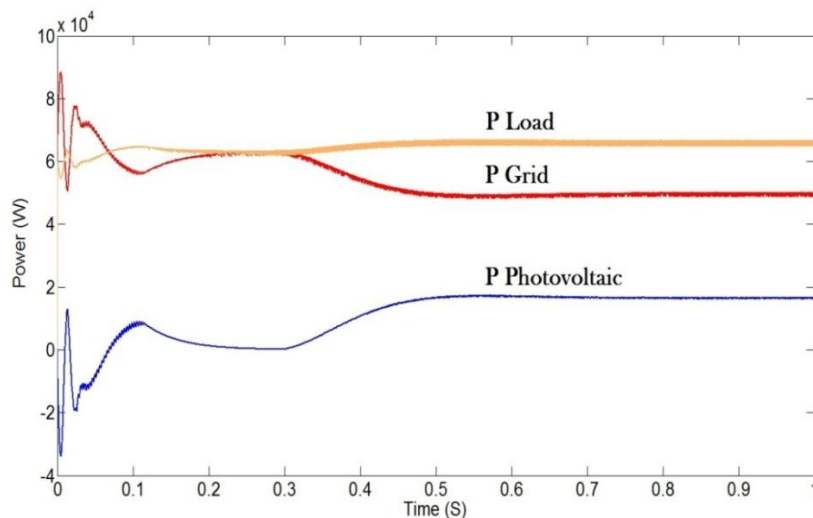
داده شده است.



شکل (۳-۵): شکل موج ولتاژ سیستم با اعمال بار خطی در شرایط نرمال شبکه (الف) ولتاژ بار، (ب) ولتاژ باس DC

شکل موج‌های ولتاژ شبکه در شرایطی که در حالت نرمال خود قرار دارد در شکل (۳-۵) نشان داده شده است. در حالتی که در شبکه خطایی رخ نداده و باری که سیستم تغذیه می‌کند خطی است، تمامی ولتاژهای شبکه به صورت سینوسی خالص بوده و اعوجاجی در شکل موج آن‌ها مشاهده نمی‌شود. در این

حالت توان‌های مبادله شده در سیستم به صورت شکل (۴-۵) خواهد بود. از این شکل مشخص است که بیشتر انرژی مصرفی بار خطی از سمت شبکه می‌آید و پس از مدت زمانی، تامین مقداری از این توان را سیستم فتوولتاییک بر عهده می‌گیرد



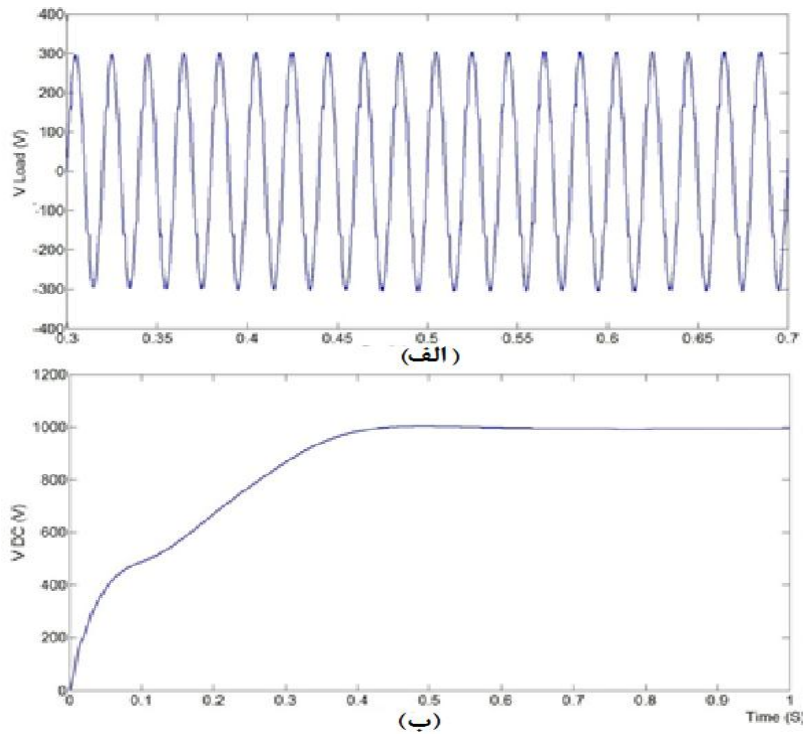
شکل (۴-۵): انتقال توان در حالت نرمال شبکه در حضور بار خطی

## ۴-۲-۵. بررسی سیستم در شرایط نرمال شبکه با اعمال بار

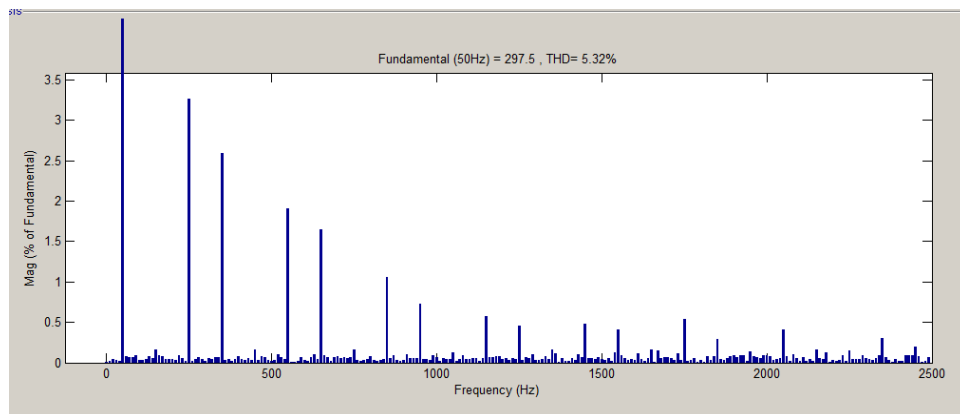
### غیر خطی

در این حالت، نتایج شبیه سازی سیستم طراحی شده با بار غیرخطی برای ولتاژهای شبکه مطابق

شکل (۵-۵) خواهد بود.

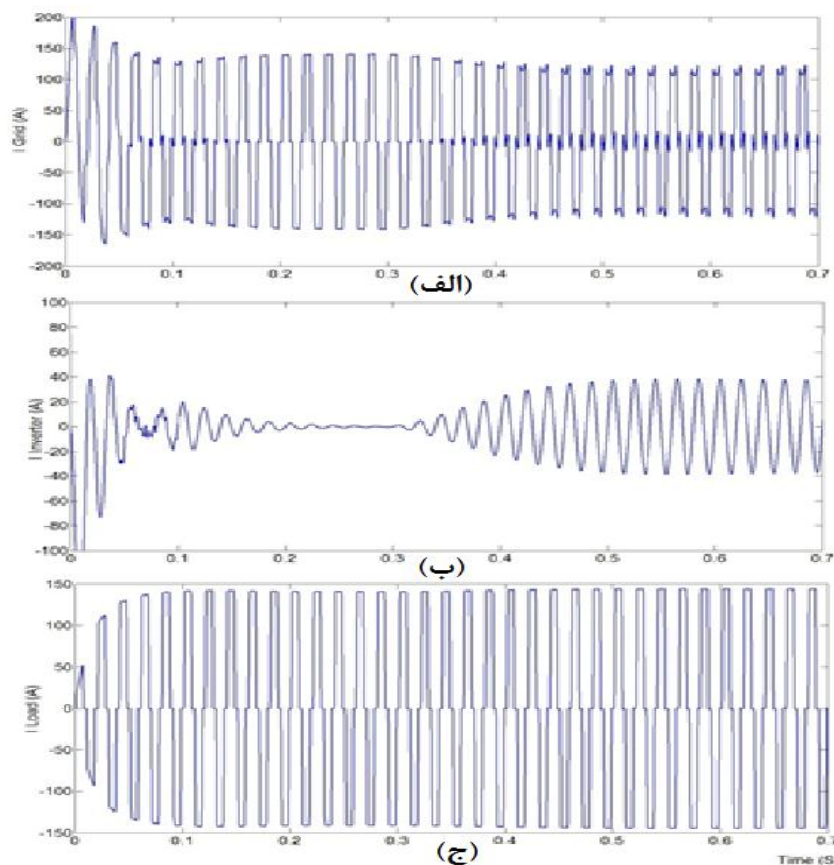


شکل (۵-۵): شکل موج ولتاژهای شبکه در حالت نرمال با اعمال بار غیرخطی (a) ولتاژ بار غیر خطی، (b) ولتاژ باس DC شکل موجهای ولتاژ باس DC و بار غیرخطی در این وضعیت که در شبکه خطا و اغتشاشی صورت نگرفته است، دارای THD، ۵.۳۲٪ است که این مقدار شرایط نامطلوبی برای سیستم به حساب می‌آید. شکل (۵-۶)، THD ولتاژ شبکه را در شرایطی که بار غیر خطی به میکروگرید اعمال می‌شود را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۶): تحلیل FFT برای شکل موج ولتاژ شبکه با اعمال بار غیر خطی

همان طور که از شکل (۶-۵) استنباط می شود ولتاژ شبکه در حالتی که بار غیر خطی حضور داشته باشد دارای هارمونیک‌هایی متعدد است که THD این ولتاژ با استانداردهای شبکه مطابق نمی‌باشد. در ادامه شکل موج‌های جریان سیستم نیز تحت همین شرایط شبکه در شکل (۷-۵) ارائه شده است.



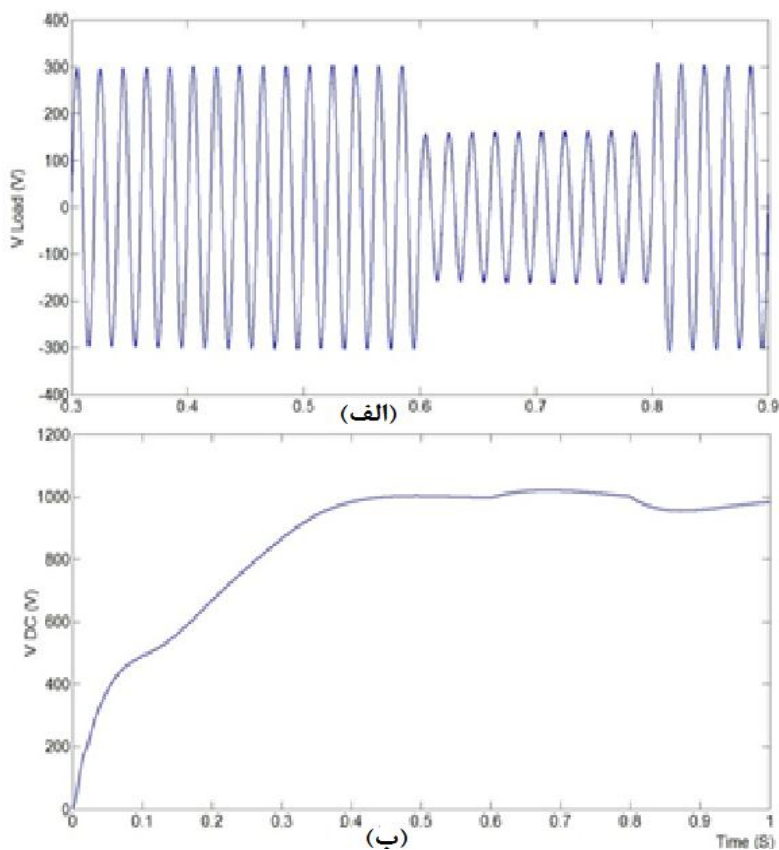
شکل (۷-۵): شکل موج‌های جریان شبکه در حالت نرمال با اعمال بار غیرخطی (الف) جریان شبکه، (ب) جریان خروجی اینورتر، (ج) جریان بار غیر خطی

## ۵-۲-۵ بررسی سیستم در شرایط خطای شبکه با اعمال بار

### خطی

در این قسمت وضعیت پارامترهای سیستم را در حالتی که با اعمال بار خطی، افت ولتاژ ۵۰ درصدی در شبکه اتفاق بیافتد، مورد شبیه سازی و بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۸-۵) شبیه سازی ولتاژهای

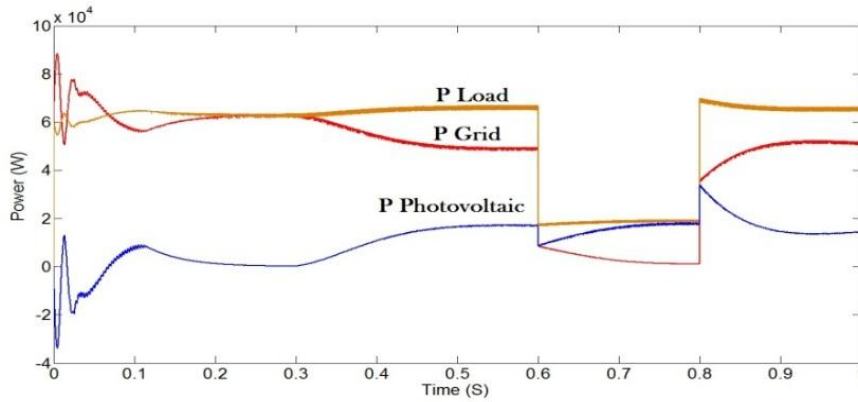
سیستم ارائه شده است.



شکل (۸-۵): ولتاژهای سیستم در شرایط افتادگی ولتاژ شبکه با اعمال بار خطی (الف) و ولتاژ بار خطی، (ب) ولتاژ باس DC

همانطور که مشاهده می‌شود، باس DC در اثر افت ولتاژ ۵۰٪ در سمت شبکه، با افزایش مقدار کمی از ولتاژ همراه است. بار خطی با کاهش ولتاژ شبکه مقدار توان کمتری را از سیستم فتوولتاییک دریافت می‌کند. در این شرایط توان‌های مبادله شده در سیستم به صورت شکل (۵-۹) می‌باشد. به نظر می‌رسد که افتادگی ولتاژ در شبکه، توان ارسالی از سمت واحد فتوولتاییک و همچنین مصرف توان در بار خطی را کاهش داده است.



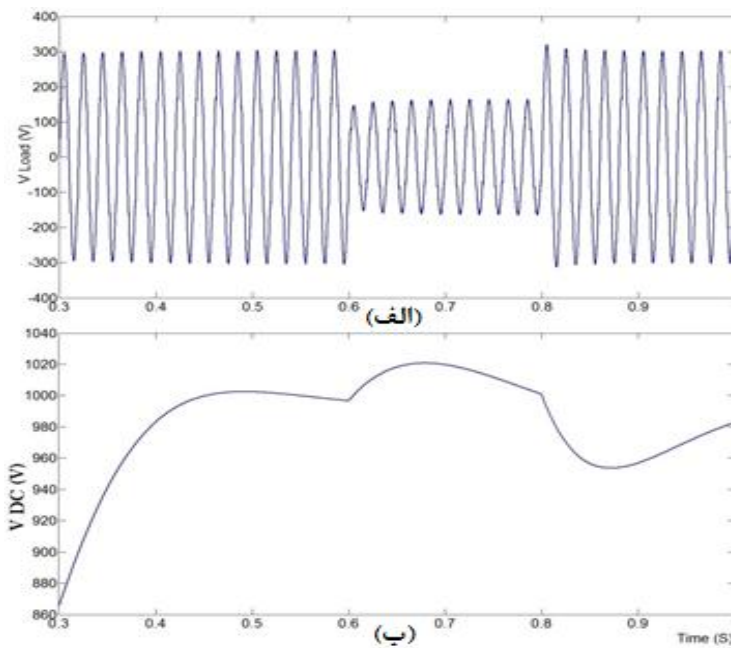


شکل (۹-۵): وضعیت توان در شرایط افت ولتاژ و اعمال بار خطی

## ۶-۲-۵ بررسی سیستم در شرایط خطای شبکه با اعمال بار غیر

### خطی

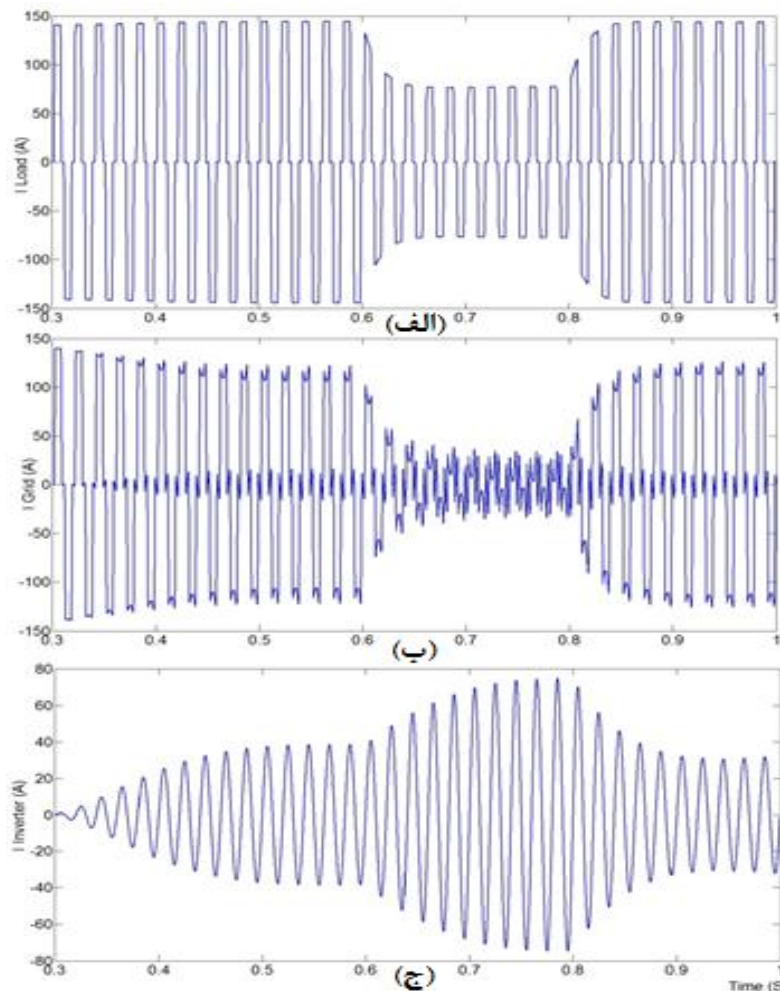
شکل (۱۰-۵) ولتاژ بار غیر خطی ۷۵ KVA و ولتاژ باس DC را در شرایطی که اندازه ولتاژ شبکه به شدت ۵۰٪ افت کند را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰-۵): ولتاژها در شرایط افت ولتاژ شبکه (الف) ولتاژ بار غیر خطی، (ب) ولتاژ باس DC

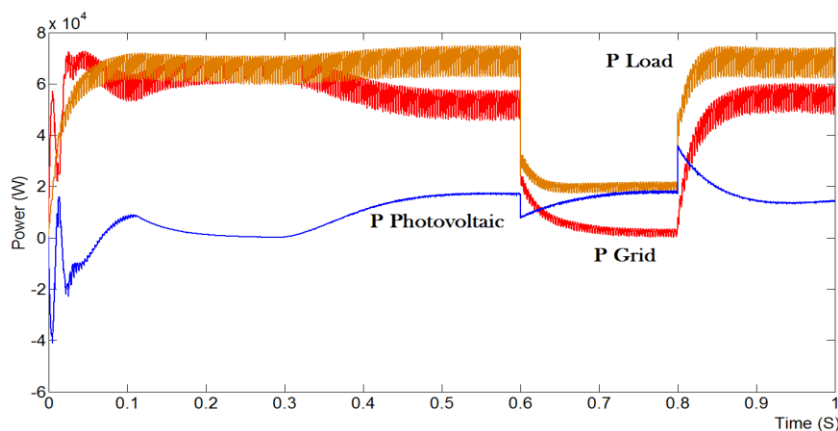
شکل (۵-۱۱) جریان‌های سیستم در همین وضعیت را نشان می‌دهد. همانطور که این شکل نشان

می‌دهد وجود بار غیر خطی باعث اعوجاجات ولتاژ و جریان خواهد شد. در حالت افت ولتاژ شبکه به واسطه اینکه جبران سازی صورت نمی‌گیرد، جریان شبکه و بار غیر خطی کاهش می‌یابد. از طرفی دیگر به جهت اینکه توان ارسالی سیستم فتوولتاییک نسبت به سایر قسمت‌های ریز شبکه وابستگی کمتری به افت ولتاژ دارد، بنابراین با کاهش ولتاژ اینورتر، جریان آن افزایش خواهد یافت. شکل (۵-۱۲) توان قسمت‌های مختلف ریز شبکه را در وضعیت افت ولتاژ نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۱): جریان‌ها در شرایط افت ولتاژ شبکه (الف) جریان بار غیر خطی، (ب) جریان شبکه، (ج) جریان خروجی

اینورتر

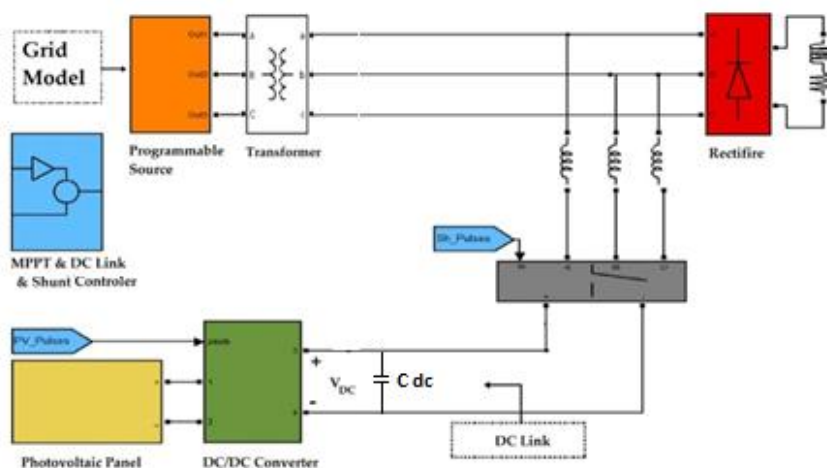


شکل (۵-۱۲): وضعیت توان در شرایط افت ولتاژ و اعمال بار غیرخطی

## ۳-۵ شبیه سازی و بررسی واحد تولید توان خورشیدی با عملکرد جبران

### ساز موازی

در این قسمت به شبیه سازی واحد تولید توان خورشیدی متصل به شبکه با بکارگیری جبران ساز موازی در شرایط خطای شبکه پرداخته می شود. این نیروگاه با استفاده از یک مبدل بوست، به یک باس DC متصل می باشد. جبران ساز موازی کار اصلاح اعوجاجات جریان و انتقال توان خورشیدی به شبکه را بر عهده دارند. جبران ساز موازی، توان تولید شده در نیروگاه خورشیدی را به بار غیر خطی منتقل می نماید. حضور بار غیر خطی باعث به وجود آمدن مشکلات کیفیت توانی می شود که به واسطه استفاده توام از جبران ساز موازی قابل حل می باشد.



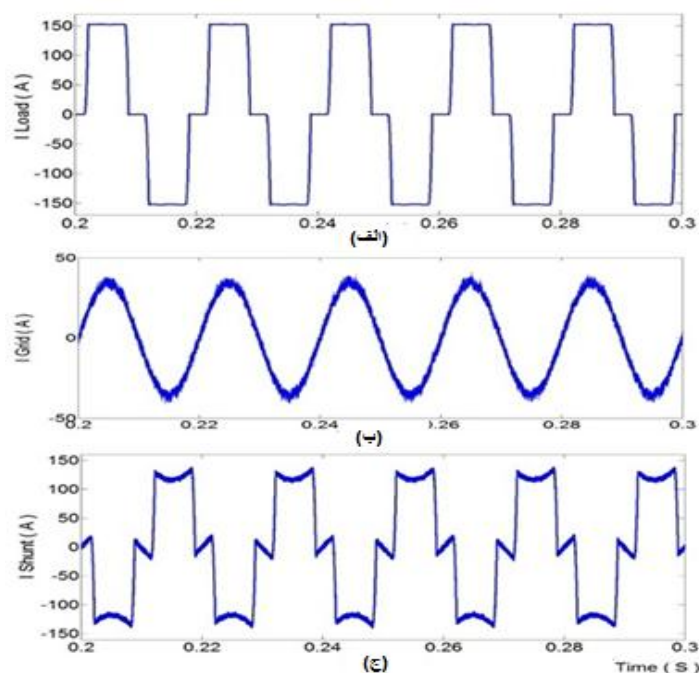
شکل (۵-۱۳): شماتیک سیستم پنل خورشید و جبران ساز متصل به شبکه و بار غیر خطی

شکل (۵-۱۳) شماتیک شبیه سازی شده سیستم مورد مطالعه در محیط Matlab/Simulink را نشان می دهد. این سیستم شامل یک منبع ولتاژ AC با ولتاژ فاز  $230\text{ V}$  و  $50\text{ Hz}$  می باشد. توان نامی بار غیر خطی  $75\text{ KVA}$  می باشد. حداکثر توان تولیدی پنل خورشید  $60\text{ KW}$  است. برای ردیابی نقطه حداکثر توان، روش معرفی شده پیاده سازی شده است. برای اتصال پنل خورشیدی و همچنین بهبود کیفیت توان، از جبران کننده موازی استفاده شده است. در این شبیه سازی با اعمال بار غیر خطی و افت ولتاژ به شبکه، عملکرد جبران ساز و همچنین تاثیر آن بر کنترل سیستم مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

### ۵-۳-۱ عملکرد سیستم با کارکرد جبران سازها در شرایط

#### نرمال شبکه

در شکل (۵-۱۴ الف))، شبیه سازی جریان سیستم بدون استفاده از جبران ساز نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در این سیستم به خاطر تغذیه بار غیر خطی، جریان غیر سینوسی بوده و علاوه بر مولفه اصلی  $50$  هرتز، شامل هارمونیک سوم، پنجم و هفتم نیز هست و همچنین THD برای این جریان  $26.9\%$  می باشد.

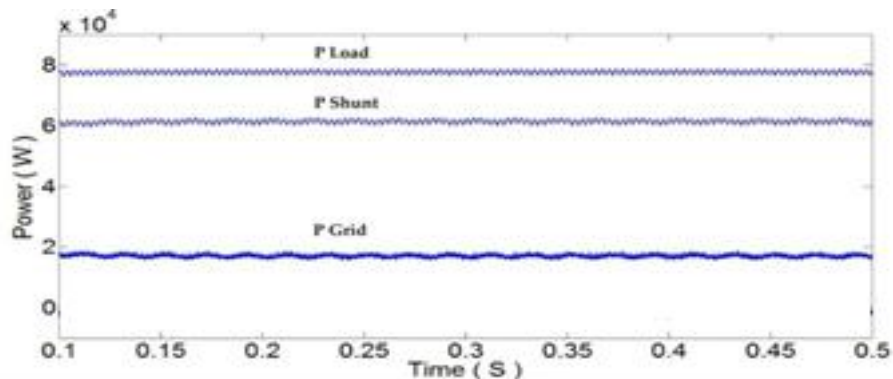


شکل (۵-۱۴): الف) جریان شبکه بدون جبراساز، ب) جریان شبکه با جبراساز، ج) جریان بخش جبراساز موازی

شکل (۵-۱۴) ب) (ج) جریان شبکه را با اعمال جبراساز به سیستم نشان می‌دهد. واضح است در این حالت جبراساز موازی با اعمال جریان تزریقی، سیگنال جریان را در وضعیت سینوسی نگه خواهد داشت و جریان‌های هارمونیک را به خوبی جبران می‌کند و جریان تقریباً سینوسی شده است. THD جریان در اینجا کمتر از ۰.۴٪ و برابر ۳.۹۲٪ است. در شکل (۵-۱۴) ج)، جریان تزریق شده توسط جبراساز موازی نشان داده شده است. این جریان هارمونیک‌های جریان بار را به خوبی تضعیف می‌کند و همچنین توان را از PV به بار در این وضعیت انتقال می‌دهد.

در جریان تغذیه بار غیر خطی، شکل (۵-۱۵) توان شبکه (P Grid)، توان بار (P Load) و توان بخش جبراساز موازی (P Shunt) را نشان می‌دهد. با تزریق جریان به شبکه از طریق بخش جبراساز موازی، مقدار زیادی از بار تامین می‌گردد. این جریان از دو بخش تشکیل شده است، بخش اول جریان جبراسازی است و بخش دیگر قسمتی از توان نیروگاه خورشیدی است که جهت تغذیه بار مورد مصرف قرار می‌گیرد. باید توجه داشت که در این شبکه از آنجا که تئوری A-GTIP برای محاسبه جریان

مرجع بخش جبران ساز موازی استفاده شده است، ضریب توان یک است و هیچ توان راکتیوی تولید و یا مصرف نمی‌شود. به عبارت دیگر استفاده از  $V^+$  در معادله (۴-۴) برای محاسبه  $I_C$  باعث از بین رفتن هارمونیک‌های جریان و تولید صرفاً توان اکتیو توسط منبع می‌شود.



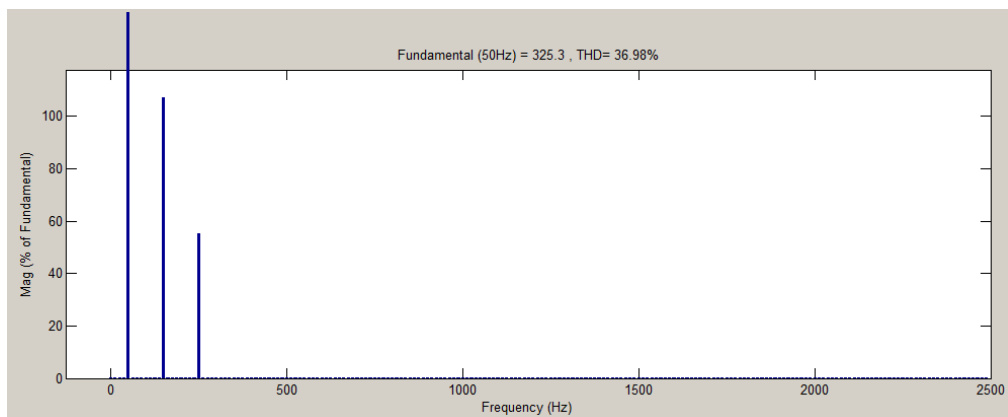
شکل (۵-۱۵): توان بار (P Load)، توان شبکه (P Grid)، توان بخش جبران ساز موازی (P Shunt)

## ۵-۳-۲ عملکرد سیستم در شرایط خطا

در این بخش وضعیت پارامترهای میکروگرید و عملکرد سیستم کنترلی آن را در شرایطی که شبکه قدرت سراسری دچار خطاهایی از قبیل تزریق هارمونیک، افت ولتاژ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا با اعمال هارمونیک به منبع ولتاژ، عملکرد جبران‌سازها مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

## ۵-۳-۲-۱ بررسی شرایط وجود هارمونیک شبکه

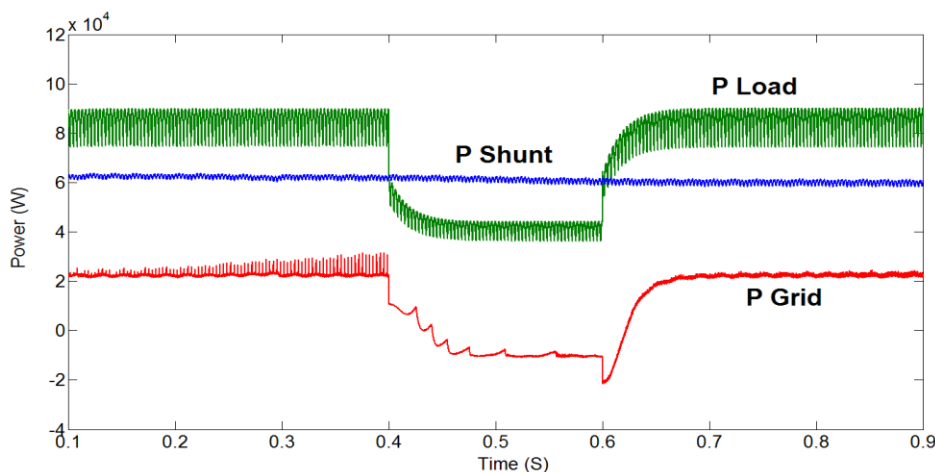
شکل (۵-۱۶) تحلیل هارمونیکی ولتاژ منبع با عملکرد جبران ساز موازی را در زمان ۰.۲ تا ۰.۴ ثانیه را که علاوه بر مولفه اصلی ۵۰ هرتز، مولفه سوم ۱۵۰ هرتز و مولفه پنجم ۲۵۰ هرتز را نیز دارد، نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، وجود هارمونیک‌های ولتاژ باعث افزایش THD به میزان ۳۶.۹۸ درصد شده است. همان طور که از این شکل مشخص است وجود جبران ساز موازی قابلیت تضعیف هارمونیک‌های ولتاژ سمت شبکه را ندارد.



شکل (۵-۱۵): تحلیل FFT برای شکل موج ولتاژ شبکه در صورت وجود هارمونیک‌های مرتبه سوم و پنجم

## ۲-۲-۳-۵ بررسی شرایط وقوع افتادگی ولتاژ در شبکه

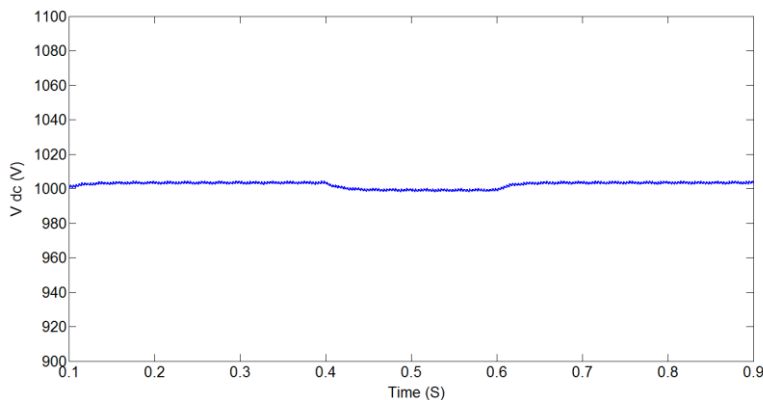
در این بخش افت ولتاژ ۵۰٪ به شبکه اعمال می‌شود و توان تولیدی نیروگاه خورشیدی ۶۰ KW است و نتایج بررسی خواهند شد. توان انتقالی به جبران ساز موازی برابر با توان تولیدی نیروگاه خورشیدی است. در این شرایط توان بخش موازی در حین وقوع خطا در سیستم رفتاری مستقل در برابر افت ولتاژ خواهد داشت و با تزریق توان فتوولتاییک وظیفه واسطه‌ای خود را در انتقال توان انجام خواهد داد. شکل (۵-۱۷) توان انتقالی شبکه، توان جبران ساز موازی و همچنین توان مصرفی بار را با وقوع افت ولتاژ ۵۰ درصد بین ۰.۲ ثانیه و ۰.۴ ثانیه نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۶): توان انتقالی بخشهای مختلف میکروگرید در حین افت ولتاژ ۵۰٪

شکل (۵-۱۷) تبادل توان در میکروگرید جهت تامین بار غیر خطی در هنگامی که افت ولتاژی به اندازه ۵۰٪ دامنه ولتاژ شبکه رخ دهد را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان درک کرد که در این شرایط جبران ساز موازی کل توان تولیدی توسط سیستم فتوولتاییک را به میکروگرید منتقل می‌کند. نکته‌ای که در اینجا می‌شود فهمید این است که مقداری از توان تزریقی فتوولتاییک به میزان ۴۰ کیلووات صرف تامین انرژی مصرفی بار می‌گردد و مابقی توان فتوولتاییک به شبکه سراسری انتقال می‌یابد. این موضوع بیانگر این مسئله است که در هنگام وقوع افت ولتاژ، شبکه نه تنها توانی به میکروگرید و بار منتقل نمی‌کند بلکه ۲۰ کیلووات از توان تولیدی میکروگرید را نیز به خود اختصاص می‌دهد. با در نظر داشتن این موضوع، یکی از راه‌های کنترل توان میکروگرید در هنگام وقوع همچنین خطایی، قطع کل مجموعه میکروگرید از شبکه جهت جلوگیری از این انتقال توان می‌باشد. با اجرای این عملیات می‌توان تولیدی سیستم فتوولتاییک را تماماً به بار انتقال داده و تاثیر خطای افت ولتاژ بر مجموعه میکروگرید و بار را به حداقل ممکن رساند.

شکل (۵-۱۸) ولتاژ باس DC را در همین شرایط نشان می‌دهد. از شکل مشخص است که ولتاژ باس DC با تقریب قابل قبولی در حین افتادگی ولتاژ شبکه تغییر نمی‌کند.



شکل (۵-۱۷): شکل موج ولتاژ باس DC در حین افتادگی ولتاژ شبکه



با بررسی شرایط خطای مختلف برای میکروگرید متصل به شبکه می توان به این تحلیل پرداخت که سیستم میکروگرید در حالتی که از جبران ساز موازی بهره نمی گیرد نسبت به هارمونیک های ایجاد شده توسط بار غیر خطی متاثر خواهد شد و اعوجاجات جریانی که پارامتری نامطلوب برای شبکه به حساب می آید را تولید و به شبکه سراسری اعمال می کند. علاوه بر این، در شرایط وقوع افتادگی ولتاژ مشاهده می شود که سیستم فتوولتاییک قابلیت انتقال توان ماکزیمم خود به شبکه و بار را در حالتی که از جبران ساز موازی استفاده نمی کند را نخواهد داشت. با اضافه کردن جبران ساز موازی در مسیر مبادله توان فتوولتاییک به شبکه، هارمونیک های تولیدی بار غیر خطی به خوبی تضعیف خواهد شد و این مجموعه توانایی انتقال تمامی توان واحد فتوولتاییک در شرایط افتادگی ولتاژ را پیدا خواهد کرد. اگرچه ۳۳٪ از توان تولیدی واحد فتوولتاییک در این شرایط به شبکه سراسری انتقال می یابد اما می توان با به کارگیری سویچ هایی سیستم میکروگرید را در شرایط افت ولتاژ شبکه به صورت جزیره ای مورد بهره برداری قرار داد و بسته به ظرفیت تولیدی واحد فتوولتاییک، می توان تاثیر پذیری بارهای حساس متصل به میکروگرید را نسبت به این افت ولتاژ با به کارگیری جبران ساز موازی به حداقل ممکن کاهش داد.



## فصل ششم : نتیجه گیری و

### پیشنهادات

## نتیجه گیری

در این پایان نامه با مطالعه و تحلیل تحقیقات انجام شده در زمینه اتصال سیستم‌های فتوولتاییک متصل به شبکه در شرایط خطا، چالش‌های موجود همچین طرحی مورد بررسی قرار گرفته است. عملیات جبران هارمونیک‌ها و کنترل افتادگی ولتاژ شبکه و کنترل کیفیت توان در این مدل بر عهده جبران ساز موازی می‌باشد. الگوریتم کنترلی مورد استفاده در این جبران سازها بر اساس تئوری تکمیلی توان لحظه-ای پایه ریزی شده است. الگوریتم جبران سازی جبران کننده اکتیو موازی باعث حذف مولفه‌های جریان-های ناخواسته می‌شود. استفاده از سیستم جبران ساز موازی به همراه نیروگاه خورشیدی می‌تواند علاوه بر رساندن توان تولیدی نیروگاه خورشیدی به شبکه و بار، اعوجاج‌های جریان بار غیرخطی را جبران کرده و در صورت بروز افت ولتاژ در شبکه و یا مشکلات دیگر، توان مصرفی بار را در حد توان تامین کند. این سیستم نسبت به نیروگاه خورشیدی و جبران ساز جداگانه به دلیل استفاده از یک اینورتر کمتر دارای مزیت اقتصادی نیز می‌باشد. یک الگوریتم ردیابی نقطه حداکثر توان هیبرید در این پایان نامه معرفی شده است. این الگوریتم، برپایه تخمین جریان حداکثر توان و همچنین استفاده از حلقه تنظیم دقیق با استفاده از روش P&O در سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه با موفقیت شبیه سازی شده است و نتایج شبیه سازی نشان دهنده عملکرد بهتر نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد.

## پیشنهادات برای تحقیقات آینده

- بررسی مدیریت توان در سیستم متشکل از واحد فتوولتایک و جبران سازها جهت حداکثر سازی سود.
- بررسی تاثیر در نظر گرفتن پروفیل بار در مدل سیستم فتوولتایک متصل به شبکه در شرایط خطا
- بررسی تاثیر نفوذ بالای سیستم فتوولتایک متصل به شبکه در شرایط خطای شبکه



## فصل هفتم : : منابع

- [1] Lopes, J. A., Hatziargyriou, N., Mutale, J., Djapic, P., & Jenkins, N. (2007). "Integrating distributed generation into electric power systems": A review of drivers, challenges and opportunities. *Electric Power Systems Research*, 77(9), 1189-1203.
- [2] Sun, K., Zhang, L., Xing, Y., & Guerrero, J. M. (2011). "A distributed control strategy based on DC bus signaling for modular photovoltaic generation systems with battery energy storage". *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 26(10), 3032-3045.
- [3] Zhang, L., Sun, K., Xing, Y., Feng, L., & Ge, H. (2011). "A modular grid-connected photovoltaic generation system based on DC bus". *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 26(2), 523-531.
- [4] Serban, E., & Serban, H. (2010). "A control strategy for a distributed power generation microgrid application with voltage-and current-controlled source converter". *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 25(12), 2981-2992.
- [5] Wu, T. F., Chang, C. H., Liu, Z. R., & Yu, T. H. (1998, February). "Single-stage converters for photovoltaic powered lighting systems with MPPT and charging features". In *Applied Power Electronics Conference and Exposition, Thirteenth Annual*, Vol. 2, pp. 1149-1155
- [6] Kazibwe, W. E., & Sendaula, M. H. (1993). "Electrical Power Quality Control Techniques. Springer."
- [7] Albuquerque, F.L., Moraes, A.J., Guimaraes, G.C., Sanhueza, S.M.R., Vaz, A.R., 2010. "Photovoltaic solar system connected to the electric power grid operating as active power generator and reactive power compensator". *Sol. Energy* 84, 1310–1317.
- [8] Peng, F. Z., Akagi, H., & Nabae, A. (1993). "Compensation characteristics of the combined system of shunt passive and series active filters". *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 29(1), 144-152.
- [9] Fujita, H., Akagi, H., (1998). "The unified power quality conditioner: the integration of series and shunt-active filters". *IEEE Trans. Power Electron.* 13 (2), 315–322.
- [10] Bina, M.T., (2003). "A new complementary method to instantaneous inactive power compensation". *IEEE/PESC* 4, 1542–1547..



- [11] Peng, F.Z., Lai, J.S., (1996). "Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems". IEEE Trans. Instrum. Meas. 45 (1), 293–297.
- [12] Pashajavid, E., Bina, M.T., (2009). "Zero-sequence component and harmonic compensation in four-wire systems under non-ideal waveforms". Przegląd Elektrotechniczny 85, 58–64.
- [13] ESRAM, T., Chapman, P.L., (2007). "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques". IEEE Trans. Energy Convers. 22 (2), 439–449
- [14] Reza Reisi, A., Hassan Moradi, M., & Jamasb, S. (2013). "Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system": A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 19, 433-443..
- [15] Alarcon-Rodriguez, A., Ault, G., & McDonald, J. (2007). "Planning the development of highly distributed power systems". In 19th International Conference on Electricity Distribution.
- [16] Sun, K., Zhang, L., Xing, Y., & Guerrero, J. M. (2011). "A distributed control strategy based on DC bus signaling for modular photovoltaic generation systems with battery energy storage". Power Electronics, IEEE Transactions on, 26(10), 3032-3045.
- [17] Bollen, M. H. (2003). "Algorithms for characterizing measured three-phase unbalanced voltage dips. Power Delivery", IEEE Transactions on, 18(3), 937-944.
- [18] Bletterie, B., Brundlinger, R., & Fechner, H. (2005, June). "Sensitivity of photovoltaic inverters to voltage sags Test results for a set of commercial products. In Electricity Distribution", 2005. CIREN 2005. 18th International Conference and Exhibition on pp. 1-4.
- [19] Mirhosseini, Mitra, Josep Pou, and V. Agelidis. "Single-and Two-Stage Inverter-Based Grid-Connected Photovoltaic Power Plants With Ride-Through Capability Under Grid Faults."
- [20] Dasgupta, S., Sahoo, S. K., Panda, S. K., & Amaratunga, G. (2011). "Single-phase inverter-control techniques for interfacing renewable energy sources with microgrid part II: series-connected inverter topology to mitigate voltage-related problems along with active power flow control". Power Electronics, IEEE Transactions on, 26(3), 732-746.
- [21] Chen, Xu, et al.(2005) "Improved Power Control of Photovoltaic Generation System under Unbalanced Grid Voltage Conditions." Power Electronics, IEEE Transactions on, 27(11), 3042-2013.

- [22] Roldán-Pérez, Javier, et al., (2014) "Helping all generations of photo-voltaic inverters ride-through voltage sags".
- [23] Blazic, B., Jurasic, A., & Papic, I. (2005). "Simulating the dynamic response of a photovoltaic generation system to voltage sags".
- [24] Shen, W., & Zhu, Y. (2011, September). "Impacts of small photovoltaic power station on voltage sag in low-voltage distribution network". In Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference on (pp. 1585-1588).
- [25] Chen, Xiaogao, et al.(2008) "Unified Control of Photovoltaic Grid-Connection and Power Quality Managements." Power Electronics and Intelligent Transportation System, IEEE Transactions on, 18(3), 937-944
- [26] Hossain, Md Kamal, and Mohd Ali. (2014) "Low voltage ride through capability enhancement of grid connected PV system by SDBR." T&D Conference and Exposition, 18(3), 937-944.
- [27] Taghizadeh, M., Sadeh, J., & Kamyab, E. (2011, October). "Protection of grid connected photovoltaic system during voltage sag". In Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on Vol. 3, pp. 2030-2035.
- [28] Yang, Y., Blaabjerg, F., & Wang, H. (2013, September). "Low voltage ride-through of single-phase transformerless photovoltaic inverters". In Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 4762-4769.
- [29] Miret, Jaume, et al. "Control scheme for photovoltaic three-phase inverters to minimize peak currents during unbalanced grid-voltage sags." Power Electronics, IEEE Transactions on 27.10 (2012): 4262-4271.
- [30] Castilla, M., Miret, J., Sosa, J. L., Matas, J., & de Vicuña, L. G. (2010). "Grid-fault control scheme for three-phase photovoltaic inverters with adjustable power quality characteristics". Power Electronics, IEEE Transactions on, 25(12), 2930-2940.
- [31] Castilla, Miguel, et al. (2010) "Grid-fault control scheme for three-phase photovoltaic inverters with adjustable power quality characteristics." Power Electronics, IEEE Transactions on 2930-2940.
- [32] Ramasamy, M., and S. Thangavel. (2012) "Photovoltaic based dynamic voltage restorer with energy conservation capability using fuzzy logic

controller."Emerging Trends in Science, Engineering and Technology (INCOSSET),. pp. 4762-4769.

- [33] Farivar, G., & Asaei, B. (2010, November). "Photovoltaic module single diode model parameters extraction based on manufacturer datasheet parameters". In Power and Energy (PECon), 2010 IEEE International Conference on pp. 929-934.
- [34] Villalva, M. G., & Gazoli, J. R. (2009). "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays". Power Electronics, IEEE Transactions on, 24(5), 1198-1208.
- [35] Pashajavid, E., Bina, M.T., (2009). "Zero-sequence component and harmonic compensation in four-wire systems under non-ideal waveforms". Przegląd Elektrotechniczny 85, 58–64.
- [36] Zhu, Y., & Tomsovic, K. (2002). "Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells". Electric Power Systems Research, 62(1), 1-11.
- [37] Noguchi, T., Togashi, S., & Nakamoto, R. (2002). "Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system. Industrial Electronics", IEEE Transactions on, 49(1), 217-223.

## **Abstract**

Rapid development of renewable energy resources and distributed generation namely photovoltaic systems has led to underscore of challenges in power quality, reliability and stability. One of this main challenges is control of micro grids in the time of grid faults. In this thesis control of photovoltaic systems under the condition of faults in grid has been addressed. Harmonic and voltage sag compensation and control of power quality are done using series and parallel compensators. The control algorithm of parallel compensators are based on the generalized theory of instantaneous power. In active series compensator the unwanted voltage harmonics are eliminated and in parallel compensator the current harmonics are treated. Using this configuration distortion of voltage and current are eliminated and in case of occurrence of a voltage sag in the grid side, voltage will remain constant on load. This configuration has an economic advantage over separate compensator system and PV inverter since it will use one less inverter. A new maximum power point tracking algorithm based on approximating maximum current and using two control loops. This method has been simulated and successfully satisfies needs of the system.

**Keywords:** Photovoltaic Power Plant, Maximum Power Point Tracking, Voltage Sag, Power Quality,



**University of Shahrood**  
**Faculty of Electronic and Robotics Engineering**

**Control of Solar Power Plant in against voltage sag in  
distribution networks**

**Ershad Rahi**

**Supervisor:**  
**Amin Hajizadeh**

**January 2015**