



جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری



دانشگاه اراک

دانشکده فنی مهندسی

پایان نامه جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد برق قدرت

**عنوان:**

**بهبود عملکرد کنترل جریان تزریقی اینورتر اتصال سلول  
خورشیدی در شبکه قدرت نامتعادل با استفاده از کنترل کننده  
تناسبی-رزونانسی پیشرفته**

پژوهشگر

**سعید عباسی**

استاد راهنما

**دکتر علی اصغر قدیمی**

استاد مشاور

**دکتر امیر حسین ابولمعمومی**

زمستان ۱۳۹۲

السلامة  
التي  
التي  
التي

## تقدیم به

آنان که موهایشان سپید شد تا ما رو سفید شویم

پدر و مادر مهربان و برادر عزیزم

که در طی تحصیل کوچکترین‌ها را هم از من دریغ نداشتند.

## Acknowledgements

## سپاس گذاری

خدای توانا را سپاس که با یاری او موفق به تدوین و نگارش این پایان نامه شدم. بر خود لازم می دانم از زحمات بی دریغ تمامی افرادی که در تنظیم و تدوین این پایان نامه مرا یاری دادند سپاس گذاری و قدردانی نمایم. بدون شک اگر زحمات صادقانه و ارزشمند این عزیزان نبود، فعالیت های علمی این پایان نامه و دستیابی نتایج بسیار مشکل می شد و اینجانب خود را وامدار این عزیزان می دانم.

در این راستا از استاد ارجمند جناب آقای دکتر علی اصغر قدیمی، که راهنمایی اینجانب را در تهیه و تنظیم این پایان نامه تقبل کردند و جناب آقای دکتر امیرحسین ابوالمعصومی استاد محترم مشاور، که رهنمودهای لازم را ارائه فرمودند سپاس گذاری و قدردانی می نمایم.

I would like also to express my gratefully appreciate for Dr. Miguel Castilla, associate professor at Technical University of Catalonia, for his cooperation and professional support.

## چکیده

نیاز به محیط‌زیستی پاک در کنار افزایش تقاضا برای انرژی مصرفی در جوامع بشری، باعث احساس نیاز به گسترش روز افزون استفاده از انرژی منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشید و باد شده است. در میان این نوع منابع تولید پراکنده استفاده مناسب از انرژی خورشیدی می‌تواند بین این افزایش تقاضا و تولید پاک تعادل ایجاد نماید. از آنجا که شبکه قدرت یک شبکه پویاست و با تاثیر پذیری از شرایط محیطی غیر قابل پیش‌بینی می‌باشد، اتصال منابع تولید پراکنده به آن توسط مبدل، نیاز به رسیدگی امنیتی و کنترل کیفیتی خواهد داشت. چرا که با رخداد هر نامتعادلی ولتاژ در شبکه، توان تزریقی این مبدل‌ها و در پی آن ولتاژ سمت DC مبدل دچار نوسانات شدید خواهد شد.

در این پایان‌نامه هدف بهبود عملکرد کنترل جریان تزریقی اینورتر اتصال سلول خورشیدی به شبکه قدرت با هدف کنترل توان با استفاده از کنترل جریان تناسبی-رزونانسی پیشرفته می‌باشد، زمانی که خطایی در شبکه رخ داده و ولتاژ شبکه قدرت تحت تاثیر آن نامتعادل شده باشد. برای این منظور کنترل جریان تناسبی-رزونانسی پیشرفته با وظیفه ردیابی جریان مرجع، روش MPPT پیشرفته برای دریافت بیشترین توان از PV و سیستم سنکرون‌ساز دقیق FLL که سازگار با نامتعادلی‌ست، طراحی می‌شوند. در نهایت برای کنترل توان تزریقی به شبکه نامتعادل، چهار روش جهت تولید جریان مرجع مناسب برای ورودی کنترل جریان ارائه شده است. علاوه بر این روشی سه مرحله‌ای برای طراحی فیلتر LCL و همچنین روشی برای بدست آوردن بهره‌های حلقه کنترل جریان PI و PR مطرح شده است.

در نهایت با شبیه‌سازی سیستم‌های متعارف و ارائه شده به صورت جداگانه در نرم‌افزار **MatLab/Simulink®** و مقایسه عملکرد آنها، روش ارائه شده، ارزیابی و صحت عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** سیستم فتوولتائیک، شبکه نامتعادل، کنترل جریان اینورتر، کنترل تناسبی-رزونانسی، کنترل توان، منابع تولید پراکنده.

فصل اول: مقدمه و اهداف پروژه.....	۱
۱.۱ تاریخچه و معرفی.....	۲
۲.۱ شرح مشکل.....	۶
۳.۱ مرور کارهای انجام شده.....	۸
۴.۱ کارهای انجام شده در این پایان نامه.....	۱۱
۵.۱ ساختار پایان نامه.....	۱۱
فصل دوم: مدلسازی سیستم فتوولتائیک.....	۱۳
۱.۲ مقدمه.....	۱۴
۲.۲ انواع ساختار اتصال سیستم‌های خورشیدی به شبکه.....	۱۴
۱.۲.۲ اینورتر مرکزی.....	۱۴
۲.۲.۲ اینورتر رشته‌ای.....	۱۵
۳.۲.۲ اینورتر چند رشته‌ای.....	۱۵
۴.۲.۲ اینورتر ماژولی.....	۱۵
۳.۲ سیستم PV متصل به شبکه و تجهیزات آن.....	۱۶
۴.۲ مدل سلول خورشیدی.....	۱۶
۵.۲ مبدل DC-DC افزایشده (بوست).....	۱۹
۶.۲ اینورترهای سه فاز AC/DC سلول خورشیدی.....	۲۰
۱.۶.۲ اینورتر تمام پل.....	۲۰
۲.۶.۲ اینورتر H5(SMA).....	۲۱
۷.۲ ساختار فیلتر.....	۲۲
۱.۷.۲ انواع توپولوژی‌های فیلتر.....	۲۲
۲.۷.۲ فیلتر با میراگر اکتیو.....	۲۴
۱.۲.۷.۲ روش مقاومت مجازی.....	۲۴
۲.۲.۷.۲ جبرانگر پس فاز-پیش فاز.....	۲۵
۳.۲.۷.۲ فیلتر برشی.....	۲۵
۳.۷.۲ فیلتر با میراگر پسیو.....	۲۵
۸.۲ کنترل سیستم فتوولتائیک.....	۲۶
۹.۲ ردیابی بیشترین توان در سلول خورشیدی.....	۲۸
۱.۹.۲ شرح عملکرد MPPT.....	۲۹
۲.۹.۲ روشهای رایج MPPT.....	۲۹
۱۰.۲ روشهای سنکرون کردن با شبکه قدرت.....	۳۰

۳۰	..... PLL حلقه قفل فاز
۳۲	..... FLL حلقه قفل فرکانس
۳۴	..... ۱۱.۲ جمع‌بندی فصل
<b>۳۶</b>	<b>..... فصل سوم: کنترل جریان اینورتر</b>
۳۷	..... ۱.۳ مقدمه
۳۸	..... ۲.۳ معرفی فضای حالت سیستم
۴۱	..... ۳.۳ هدف از کنترل جریان
۴۲	..... ۱.۳.۳ کنترل جریان
۴۳	..... ۲.۳.۳ کنترل ولتاژ لینک DC
۴۵	..... ۴.۳ انواع جبرانسازهای کنترل جریان
۴۵	..... ۱.۴.۳ کنترل جریان با کنترلر PI
۴۹	..... ۲.۴.۳ کنترل جریان با کنترلر PR
۵۷	..... ۵.۳ مقایسه و بررسی مشکلات روش‌های کنترل
۵۸	..... ۶.۳ روش متعارف کنترلی برای جریان تزریقی در حالت متعادل شبکه
۶۰	..... ۷.۳ عملکرد روش کنترل جریان متعارف در هنگام رخداد خطا و شبکه نامتعادل
۶۱	..... ۸.۳ کنترل توان تحت شرایط نامتعادل شبکه
۶۳	..... ۹.۳ جمع‌بندی فصل
<b>۶۴</b>	<b>..... فصل چهارم: روش کنترلی ارائه شده</b>
۶۵	..... ۱.۴ مقدمه
۶۵	..... ۲.۴ طراحی روش MPPT پیشرفته
۶۶	..... ۳.۴ طراحی فیلتر LCL با میراگر پسیو
۷۰	..... ۴.۴ طراحی خازن لینک DC
۷۵	..... ۵.۴ تعیین فرکانس نمونه‌برداری
۷۶	..... ۶.۴ ارائه سیستم سنکرون‌ساز DSOGI-FLL
۷۷	..... ۷.۴ ارائه روش کنترلی برای جریان تزریقی در حالت متعادل و نامتعادل شبکه
۸۰	..... ۱.۷.۴ کنترل توالی مثبت متعادل (BPSC)
۸۱	..... ۲.۷.۴ کنترل توان اکتیو و راکتیو میانگین (AARC)
۸۲	..... ۳.۷.۴ کنترل توالی‌های مثبت و منفی (PNSC)
۸۴	..... ۴.۷.۴ کنترل توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای (IARC)
۸۷	..... ۸.۴ جمع‌بندی فصل
<b>۸۹</b>	<b>..... فصل پنجم: شبیه‌سازی و تحلیل نتایج</b>
۹۰	..... ۱.۵ مقدمه



۹۰	انتخاب سیستم شبیه‌سازی و مشخصات	۲.۵
۹۰	شبیه‌سازی سلول خورشیدی	۱.۲.۵
۹۱	شبیه‌سازی MPPT و مبدل بوست	۲.۲.۵
۹۲	شبیه‌سازی اینورتر و فیلتر متصل	۳.۲.۵
۹۴	شبیه‌سازی مدل خط انتقال	۴.۲.۵
۹۴	پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده	۳.۵
۹۵	تبدیل به پریونیت مقادیر	۴.۵
۹۶	شبیه‌سازی سیستم در حالت متعادل شبکه	۵.۵
۹۶	تحلیل نتایج سیستم کنترل متعارف در حالت متعادل شبکه	۱.۵.۵
۹۸	تحلیل نتایج سیستم ارائه شده در حالت متعادل شبکه	۲.۵.۵
۹۹	شبیه‌سازی سیستم در حالت نامتعادل شبکه	۶.۵
۱۰۰	تحلیل نتایج سیستم متعارف در حالت نامتعادل شبکه	۱.۶.۵
۱۰۱	تحلیل نتایج سیستم ارائه شده در حالت نامتعادل شبکه	۲.۶.۵
۱۰۸	تحلیل اثر MPPT	۳.۶.۵
۱۰۹	تحلیل اثر DSOGI-FLL	۴.۶.۵
۱۱۰	تحلیل اثر میراگر فیلتر	۵.۶.۵
۱۱۱	جمع‌بندی	۷.۵
۱۱۲	<b>فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات</b>	
۱۱۳	نتیجه‌گیری	۱.۶
۱۱۴	پیشنهادات	۲.۶
۱۱۶	<b>منابع و مراجع</b>	

شکل ۱.۱ نمودار ستونی اتصال مولدهای PV متصل به شبکه و جدا از شبکه [۳].....	۴
شکل ۲.۱ توان سیستم‌های PV متمرکز و غیر متمرکز بر حسب (MW) در قاره‌های مختلف تا سال ۲۰۱۲ [۴].....	۵
شکل ۳.۱ نیروگاه خورشیدی تحقیقاتی 15 kW دانشگاه اراک.....	۶
شکل ۴.۱ شماتیک دیاگرام اتصال سیستم PV به شبکه قدرت.....	۷
شکل ۱.۲ ساختار اتصال سیستم‌های خورشیدی به شبکه (a) اینورتر مرکزی (b) اینورترهای رشته‌ای (c) اینورتر چندرشته‌ای (d) اینورترهای ماژولی.....	۱۴
شکل ۲.۲ بلوک دیاگرام سیستم PV متصل به شبکه.....	۱۶
شکل ۳.۲ مدار معادل الکتریکی سلول خورشیدی.....	۱۷
شکل ۴.۲ تغییرات مشخصه PV تحت تغییرات (a) تابش و (b) دما.....	۱۸
شکل ۵.۲ مشخصه‌های (a) ولتاژ-جریان و (b) ولتاژ-توان برای واحد سلول خورشیدی Sunpower A300.....	۱۸
شکل ۶.۲ مبدل DC-DC بوست.....	۱۹
شکل ۷.۲ اساس اینورتر تمام-پل.....	۲۰
شکل ۸.۲ اساس اینورتر H5.....	۲۱
شکل ۹.۲ توپولوژی کلی فیلتر در مدار بصورت تک‌فاز.....	۲۲
شکل ۱۰.۲ دیاگرام بود الف) فیلتر L (ب) فیلتر LC (ج) فیلتر LCL.....	۲۳
شکل ۱۱.۲ حالت‌های ممکن برای میراگر پسیو.....	۲۵
شکل ۱۲.۲ حلقه کنترلی فیلتر LCL با میراگر پسیو [۲۲].....	۲۶
شکل ۱۳.۲ ساختار کنترلی عمومی برای PV و اینورتر با مبدل بوست.....	۲۷
شکل ۱۴.۲ بلوک دیاگرام حلقه کنترلی PLL.....	۳۱
شکل ۱۵.۲ بلوک دیاگرام DSOGI با PNSC [۳۱].....	۳۳
شکل ۱۶.۲ بلوک دیاگرام FLL [۱۹].....	۳۳
شکل ۱۷.۲ قابلیت فیلترینگ DSOGI-FLL در فرکانس ۵۰ هرتز.....	۳۴
شکل ۱.۳ بلوک دیاگرام اتصال اینورتر PV به شبکه با فیلتر و کنترلر.....	۳۸
شکل ۲.۳ بلوک دیاگرام حلقه کنترل جریان.....	۴۲
شکل ۳.۳ بلوک دیاگرام حلقه کنترل ولتاژ لینک DC.....	۴۴
شکل ۴.۳ دسته‌بندی روش‌های کنترل جریان [۱۹].....	۴۵
شکل ۵.۳ بلوک دیاگرام کنترل جریان PI.....	۴۶
شکل ۶.۳ دیاگرام بود و مکان ریشه حلقه کنترل جریان.....	۴۸
شکل ۷.۳ پاسخ پله حلقه کنترل جریان.....	۴۹

شکل ۸.۳	بلوک کنترل جریان PR بدون جبران‌ساز هارمونیکی	۵۰
شکل ۹.۳	دیاگرام بود و مکان ریشه حلقه کنترل جریان PR ایده‌آل بدون جبران‌ساز هارمونیکی	۵۱
شکل ۱۰.۳	دیاگرام بود تابع تبدیل حلقه بسته کنترلر PR	۵۲
شکل ۱۱.۳	دیاگرام بود و مکان ریشه حلقه کنترل جریان PR غیر ایده‌آل بدون جبران‌ساز هارمونیکی	۵۳
شکل ۱۲.۳	بلوک کنترل جریان PR با جبران‌ساز هارمونیک سوم و پنجم و هفتم	۵۴
شکل ۱۳.۳	دیاگرام بود حلقه باز کنترلر PR با جبران‌ساز هارمونیک سوم و پنجم و هفتم	۵۵
شکل ۱۴.۳	دیاگرام بود حلقه بسته کنترلر PR با جبران‌ساز هارمونیک سوم و پنجم و هفتم	۵۵
شکل ۱۵.۳	پاسخ پله حلقه کنترلی PR با جبران‌ساز هارمونیکی	۵۶
شکل ۱۶.۳	پاسخ حلقه کنترلی PR با جبران‌ساز هارمونیکی به ورودی سینوسی	۵۶
شکل ۱۷.۳	بلوک دیاگرام روش کنترلی متعارف با جبران‌ساز PI یا PR ایده‌آل بدون جبران‌ساز هارمونیکی	۵۹
شکل ۱.۴	بلوک دیاگرام روش IC با استفاده از کنترلر PI	۶۶
شکل ۲.۴	دیاگرام برداری مبدل شبکه	۶۸
شکل ۳.۴	مدار معادل تک‌فاز فیلتر LCL در هارمونیک $h$ ام	۶۸
شکل ۴.۴	دیاگرام بود فیلتر LCL طراحی شده بدون میراگر	۶۹
شکل ۵.۴	دیاگرام بود فیلتر LCL طراحی شده با میراگر پسیو	۷۰
شکل ۶.۴	دیاگرام مکان ریشه گسسته زمان حلقه کنترلی لینک DC	۷۱
شکل ۷.۴	دیاگرام بود حلقه کنترلی لینک DC	۷۳
شکل ۸.۴	ناحیه پایدار بهره‌برداری اینورتر دومرحله‌ای با مبدل بوست و حلقه باز کنترلی [۳۹]	۷۴
شکل ۹.۴	نمودار مکان ریشه برای حلقه کنترلی باز کنترل جریان PI با فرکانس نمونه برداری $10\text{ kHz}$	۷۵
شکل ۱۰.۴	پاسخ DSOGI-FLL در تجزیه توالی‌های مثبت و منفی ولتاژ نامتعادل	۷۷
شکل ۱۱.۴	فرکانس تشخیص داده شده توسط DSOGI-FLL قبل و بعد از خطا	۷۷
شکل ۱۲.۴	سیستم کنترلی برای جریان تزریقی در حالت نامتعادلی شبکه	۷۹
شکل ۱۳.۴	سیستم کنترل جریان اینورتر با روش PNSC یا AARC	۸۴
شکل ۱۴.۴	آنالیز FFT برای جریان مرجع تزریقی با کنترلر PR در شبکه متعادلی که در ثانیه 0.6 خطای دوفاز نوع C رخ می‌دهد	۸۶
شکل ۱۵.۴	سیستم کنترل جریان اینورتر با روش IARC	۸۷
شکل ۱.۵	شبیه‌سازی مدل سلول خورشیدی	۹۱
شکل ۲.۵	پیاده‌سازی روش IC با استفاده از کنترلر PI در MATLAB Simulink	۹۱
شکل ۳.۵	شبیه‌سازی مبدل DC-DC بوست با MPPT-INC-PI در MATLAB	۹۲
شکل ۴.۵	شبیه‌سازی خازن لینک DC و اینورتر و فیلتر LCL	۹۲

شکل ۵.۵	شبیه‌سازی حلقه کنترلی VSC	۹۳
شکل ۶.۵	بلوک دیاگرام شبیه‌سازی شده DSOGI-FLL	۹۳
شکل ۷.۵	مدل شبیه‌سازی شبکه قدرت	۹۴
شکل ۸.۵	توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه با کنترل جریان PI یا PR متعارف	۹۷
شکل ۹.۵	ولتاژ سمت DC با کنترل جریان PI یا PR متعارف	۹۷
شکل ۱۰.۵	توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه با روش ارائه شده	۹۸
شکل ۱۱.۵	ولتاژ سمت DC با روش ارائه شده	۹۸
شکل ۱۲.۵	ولتاژ شبکه قدرت با خطای افت ولتاژ نوع C	۹۹
شکل ۱۳.۵	توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه بدون روش کنترل توان با جبران‌ساز PI یا PR	۱۰۰
شکل ۱۴.۵	ولتاژ سمت DC بدون اعمال روش کنترل توان با جبران‌ساز PI یا PR	۱۰۰
شکل ۱۵.۵	توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه با روش BPSC	۱۰۱
شکل ۱۶.۵	ولتاژ سمت DC با روش BPSC	۱۰۲
شکل ۱۷.۵	جریان‌های مرجع و جریان تزریقی به شبکه با روش BPSC	۱۰۲
شکل ۱۸.۵	توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه با روش AARC	۱۰۳
شکل ۱۹.۵	ولتاژ سمت DC با روش AARC	۱۰۳
شکل ۲۰.۵	جریان‌های مرجع و جریان تزریقی به شبکه با روش AARC	۱۰۴
شکل ۲۱.۵	توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه با روش PNSC	۱۰۵
شکل ۲۲.۵	ولتاژ سمت DC با روش PNSC	۱۰۵
شکل ۲۳.۵	جریان‌های مرجع و جریان تزریقی به شبکه با روش PNSC	۱۰۶
شکل ۲۴.۵	توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه با روش IARC	۱۰۷
شکل ۲۵.۵	ولتاژ سمت DC با روش IARC	۱۰۷
شکل ۲۶.۵	جریان مرجع و جریان تزریقی به شبکه با روش IARC	۱۰۸
شکل ۲۷.۵	تاثیر MPPT ارائه شده بر توان اکتیو و راکتیو تزریقی	۱۰۹
شکل ۲۸.۵	پاسخ سیستم سنکرون ساز سه فاز به نامتعادلی ولتاژ شبکه در لحظه 0.6 sec الف) -SRF	۱۱۰
شکل ۲۹.۵	شکل موج جریان مرجع و ردیابی شده بدون میراگر فیلتر	۱۱۱

جدول ۱.۱	میزان رشد سالیانه استفاده از انرژی خورشیدی در جهان	۳
جدول ۲.۱	دسته‌بندی روش‌های رایج MPPT [۶]	۹
جدول ۱.۴	هارمونیک‌های سیگنال جریان	۸۷
جدول ۱.۵	مقادیر نامی سیستم	۹۴
جدول ۲.۵	پارامترهای کنترلی سیستم	۹۵
جدول ۳.۵	پارامترهای مقادیر مبنا برای تبدیل به پریونیت	۹۶

# فصل اول:

## مقدمه و اهداف پروژه

## ۱.۱ تاریخچه و معرفی

پیشینه استفاده از انرژی خورشیدی به سالیان قبل بازمی‌گردد، آن زمان که ارشمیدس با نصب تعداد زیادی آئینه‌های کوچک مربعی شکل در کنار یکدیگر که روی یک پایه متحرک قرار داشته است اشعه خورشید را از راه دور روی کشتی‌های رومیان متمرکز ساخته و به این ترتیب آنها را به آتش کشید. با وجود آنکه انرژی خورشید و مزایای آن در قرون گذشته به خوبی شناخته شده بود، ولی بالا بودن هزینه اولیه چنین سیستم‌هایی از یک طرف و عرضه نفت و گاز ارزان از طرف دیگر، سد راه پیشرفت این سیستم‌ها شده بود تا اینکه افزایش قیمت نفت در سال ۱۹۷۳ باعث شد که کشورهای پیشرفته صنعتی مجبور شدند به مسئله تولید انرژی از راه‌های دیگر (غیر از استفاده سوخت‌های فسیلی) توجه جدی‌تری نمایند.

انرژی نو یا انرژی تجدیدپذیر به آن دسته از انرژی‌ها گفته می‌شود که برای تولیدشان از منابع بدون کربن استفاده می‌گردد. مانند انرژی خورشیدی، انرژی بادی، انرژی دریایی، زمین گرمایی، نیروگاه‌های آبی و کربن خنثی مانند زیست توده. از هیدروژن نیز که در پیل‌های هیدروژنی قادر به ذخیره انرژی است، به عنوان انرژی نو نام برده می‌شود. این نوع انرژی‌ها معایب سوخت‌های فسیلی مانند افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن و در نتیجه افزایش گازهای گلخانه‌ای و دمای کره زمین همچنین تغییرات آب و هوایی و آلودگی زیست محیطی را ندارند [۱]. علاوه بر این منابع تولید آن‌ها تمام نشدنی و بدون محدودیت است. در بین منابع یاد شده، انرژی خورشیدی یکی از در دسترس‌ترین منابع انرژی می‌باشد و کل انرژی که از طریق خورشید به زمین می‌رسد ۱۰۰۰۰ بار بیشتر از انرژی مورد نیاز انسان است. امید است نیروگاه‌های خورشیدی که انرژی خورشید را به برق تبدیل می‌کنند با مزایای قاطعی که در برابر نیروگاه‌های فسیلی و اتمی دارند، از همه مهمتر اینکه سازگار با محیط زیست نیز می‌باشند، مشکل تامین برق بخصوص در دوران اتمام ذخائر نفت و گاز را حل نمایند. تأسیس و بکارگیری نیروگاه‌های خورشیدی آینده‌ای پر ثمر و زمینه‌ای گسترده برای کمک به خودکفایی و قطع وابستگی کشورمان ایران را به صادرات نفت فراهم خواهد کرد.

طبق آخرین برآوردهای رسمی اعلام شده عمر خورشید بیش از ۱۴ میلیارد سال می‌باشد. از این رو استفاده از این منبع انرژی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. روند روبه رشد استفاده از

این انرژی پاک در جدول ۱.۱ آمده است. بر اساس پیش‌بینی‌ها تا سال ۲۰۵۰ ظرفیت 30GW نیروگاه انرژی خورشیدی تنها در بریتانیا نصب خواهد شد [۲].

جدول ۱.۱

میزان رشد سالیانه استفاده از انرژی خورشیدی در جهان

سال (میلادی)	ظرفیت نصب شده (گیگاوات)
2005	5.4
2006	7.0
2007	9.4
2008	15.7
2009	22.9
2010	39.7
2011	67.4

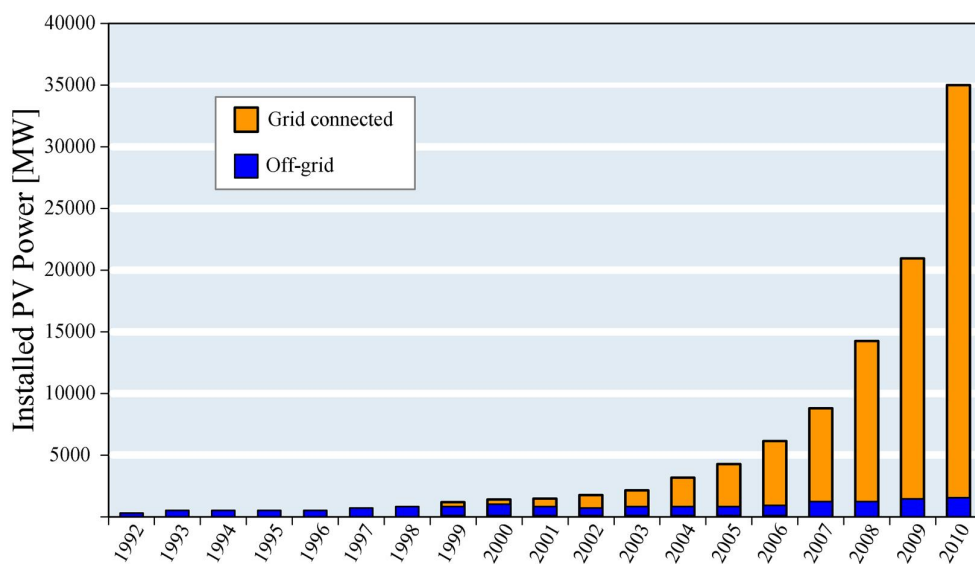
استفاده از این انرژی به دو صورت امکان‌پذیر است:

- استفاده از انرژی حرارتی خورشید برای مصارف خانگی، صنعتی و نیروگاهی.
  - تبدیل مستقیم پرتوهای خورشید به الکتریسیته بوسیله تجهیزاتی به نام فتوولتائیک.
- سلول خورشیدی یک ابزار غیر مکانیکی است که معمولاً از آلیاژ سیلیکون ساخته می‌شود. آرایه‌های فتوولتائیک، انرژی خورشیدی را به صورت مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند و در مقایسه با سیستم‌های سنتی تولید انرژی، باعث آلودگی محیط زیست نمی‌گردند و همچنین هزینه بهره‌برداری نیز ندارند. از این رو مشاهده می‌شود که استفاده از این منابع در سطح وسیع و تولید نیروگاهی در سراسر دنیا روز به روز رو به افزایش است.
- نور خورشید از فوتونها یا ذرات انرژی خورشیدی ساخته شده است. این فوتونها که مقادیر متغیر انرژی را شامل می‌شوند، درست مشابه با طول موجهای متفاوت طیفهای نوری هستند. وقتی فوتونها به یک سلول فتوولتائیک برخورد می‌کنند، ممکن است منعکس شوند، مستقیم از میان آن عبور کنند و یا جذب شوند. فقط فوتونهای جذب شده انرژی را برای تولید الکتریسیته فراهم می‌کنند. برای ایجاد ولتاژ و جریان مناسب، سلول‌های خورشیدی را بصورت سری و



موازی متصل می‌کنند. از اتصال چند سلول خورشیدی ماژول‌های خورشیدی ساخته می‌شوند و از اتصال چند ماژول به یکدیگر آرایه خورشیدی ساخته خواهد شد. با اتصال سری موازی آرایه‌های خورشیدی در واقع نیروگاه خورشیدی تاسیس شده است.

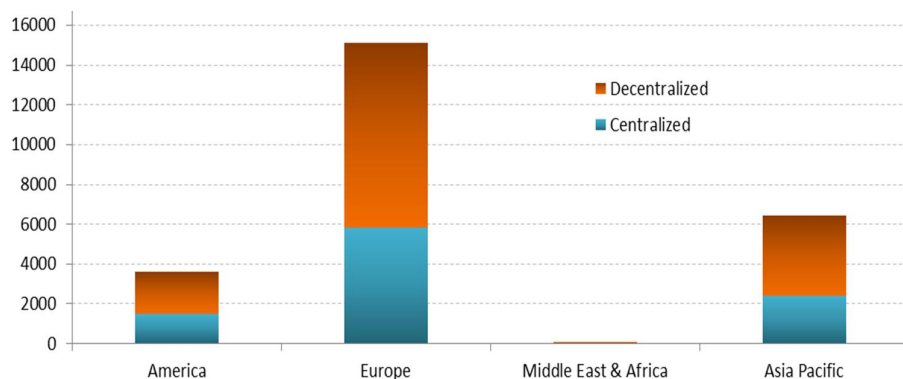
دیگرام ستونی شکل ۱.۱ روند رو به رشد استفاده از انرژی خورشیدی در سطح نیروگاهی و متصل به شبکه را با استفاده در سطح محلی و جدا از شبکه را با یکدیگر مقایسه کرده است. همانطور که مشخص است در سال‌های اخیر استفاده روز افزون و گسترده از این انرژی در سطح نیروگاهی با نرخ بالایی رو به افزایش است. این امر گواه این است که مطالعات علمی پژوهشی گسترده‌تری در زمینه کنترل این نیروگاه‌ها به منظور افزایش کیفیت توان تولیدی، راندمان و بهبود بهره‌برداری در شرایط مختلف شبکه قدرت نیاز است.



شکل ۱.۱ نمودار ستونی اتصال مولدهای PV متصل به شبکه و جدا از شبکه [۳]

در سال‌های اخیر بهره‌برداری مبدل‌ها تحت شرایط نامتعادل شبکه، عمدتاً افت ولتاژ (Sag) چالش اصلی برای صنعت تولید و توزیع شده است. اولین مطالعات روی این مسئله قبل از حضور منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه قدرت بوده است. در واقع اولین مطالعات درباره بهبود عملکرد یکسوسازهای فعال در منابع توان و درایو موتورها صورت پذیرفته است. برخی از اولین مطالعات در باب کنترل یکسوسازها تحت شرایط نامتعادل شبکه در سال ۱۹۹۰ روی تنظیم جریان کشیده شده از شبکه به منظور کاهش حساسیت سیستم به اغتشاشات انجام شده است.

کنترل مبدل سلول خورشیدی متصل به شبکه نیز شباهت‌های زیادی به کنترل یکسوسازهای فعال دارد.



شکل ۲.۱ توان سیستم‌های PV متمرکز و غیر متمرکز بر حسب (MW) در قاره‌های مختلف تا سال ۲۰۱۲ [۴]

در شکل ۲.۱ دیاگرام ستونی میزان توزیع توان بهره‌برداری شده از انرژی خورشیدی بر اساس آمار آژانس بین‌المللی انرژی در قاره‌های مختلف تا سال ۲۰۱۲ نشان داده شده است. مسئله مورد توجه استفاده حدود ۱۵ گیگاواتی اروپا از انرژی خورشیدی می‌باشد که نه تنها از نظر وسعت نسبت به سایر قاره‌ها کوچکتر است بلکه کمترین بهره از تابش نور خورشید را نیز داراست. از طرف دیگر بخش خاورمیانه و آفریقا که نه تنها پهناور هستند بلکه بیشترین سهم از تابش انرژی خورشید را نیز دارا هستند، به دلیل تکنولوژی پایین کمترین توان را از این نعمت خدادادی بهره‌برداری می‌کنند.

در ایران استفاده از انرژی خورشیدی به صورت تحقیقاتی و در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی مورد استفاده قرار گرفته است که نمونه آن نصب نیروگاه ۱۵ کیلوواتی دانشگاه اراک نشان داده شده در شکل ۳.۱ می‌باشد که توسط مولفین این پایان‌نامه طراحی و نصب شده است. مطالعه رفتار و تجهیزات لازم جهت اتصال نیروگاه خورشیدی به شبکه برق و بررسی مشکلات احتمالی در آن مسئله مهمی است که لازم به بررسی است که در آینده بتوان به صورت عملی و با کمترین مشکلات نیروگاه‌های خورشیدی در سطوح توان بالا را نصب نمود.



شکل ۳.۱ نیروگاه خورشیدی تحقیقاتی 15 kW دانشگاه اراک

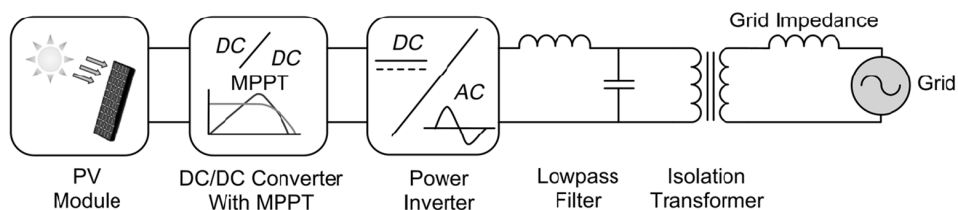
## ۲.۱ شرح مشکل

برق تولیدی آرایه فتوولتاییک برق جریان مستقیم (DC) می‌باشد که با تغییر شرایط جوی بصورت غیر خطی متغیر خواهد بود. از این رو برای اتصال این توان به شبکه قدرت چند مسئله پیش رو است. ابتدا اینکه سطح ولتاژ خروجی متغیر آن را بالا برده و آن را ثابت کنیم. مسئله دیگر اینکه این برق جریان مستقیم را به برق جریان متناوب (AC) تبدیل کنیم که قابل اتصال به شبکه باشد. دیگر اینکه این برق AC تولید شده دارای هارمونیک‌های بسیار بالا می‌باشد که برای اتصال به شبکه باید فیلتر شوند. در نهایت نیز یک ترانسفورماتور (که در ادامه معرفی خواهد شد) نیاز است که سیستم PV را از شبکه مجزا کند.

دیگرام مفهومی نحوه اتصال آرایه خورشیدی به شبکه قدرت در شکل ۴.۱ نشان داده شده است. در این دیگرام برای اتصال PV به شبکه در مرحله اول یک مبدل DC-DC به منظور افزایش سطح ولتاژ و ردیابی بیشترین توان (MPPT)<sup>۱</sup> قابل جذب از PV و تبدیل آن به یک

<sup>۱</sup> Maximum Power Point Tracking (MPPT)

منبع ولتاژ ثابت استفاده شده است. در مرحله بعد جریان DC تولید شده توسط اینورتر به برق جریان متناوب (AC) سنکرون با شبکه تبدیل خواهد شد. در مرحله آخر این برق تولید شده که دارای نوسانات فرکانس بالای زیادی می‌باشد توسط یک فیلتر پایین گذر LCL و یک ترانسفورماتور، تبدیل به توان مناسب جهت تزریق به شبکه قدرت خواهد شد.



شکل ۴.۱ شماتیک دیاگرام اتصال سیستم PV به شبکه قدرت

با افزایش PV های ظرفیت بالا در سیستم می‌بایست تاثیر کنترل آنها روی فیدرها، مصرف-کنندگان، مشخصه‌های دینامیکی سیستم، حالت گذرا و تقابل با شبکه و بار مورد بررسی قرار گیرد [۵]. پر واضح است که برای پیاده‌سازی این سیستم‌ها، کنترلرهای پیچیده، مقاوم<sup>۲</sup> و دقیقی نیاز است. چراکه با رخداد خطا در شبکه قدرت معمولا باعث ایجاد نامتعادلی در نقطه اتصال مبدل به شبکه (PCC<sup>۳</sup>) خواهد شد. تحت این شرایط نامتعادل جریان تزریقی مبدل به شبکه از حالت سینوسی خارج خواهد شد و نامتعادل نیز می‌شود. کنش بین این جریان و ولتاژ نامتعادل شبکه باعث نوسانات غیر قابل کنترل در توان تزریقی اکتیو و راکتیو خواهد شد. بهره‌برداری مبدل قدرت تحت چنین شرایطی چالش اصلی مورد نظر است. کنترل مناسب مبدل تحت شرایط عمومی شبکه مسئله مهمی در اتصال منابع تجدیدپذیر به شبکه می‌باشد. جدا از شرایط کاملا ثابت و متعادل، شبکه قدرت یک سیستم پویا و زنده است که از خطاها، تشدیدها، اضافه‌بارها و ... تاثیر می‌پذیرد. بنابراین تاثیر تولید PV روی پایداری و امنیت سیستم قدرت باید به دقت بررسی شود چراکه پاسخ ژنراتور PV به اختلالات شبکه می‌تواند این

<sup>2</sup> Robust

<sup>3</sup> Point of Common Coupling