

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه بیرجند  
دانشکده مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

طراحی و کنترل اینورتر سه فاز سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه با قابلیت پشتیبانی توان راکتیو و بهبود

کیفیت توان

امیر سیفی

استاد راهنما:

محمدعلی شمسی نژاد

استادان مشاور:

دکتر محمود عبادیان

دکتر حسین الیاسی

زمستان ۱۳۹۲

## تأییدیه هیئت داوران

(برای پایان نامه)

یک نسخه اصل فرم مربوطه

## **\*\*\*تبارک الله الذی بیده الملک و هو علی کل شیء قدیر\*\*\***

**منشأ خیر و برکت است آن ذات اقدس که فرمانروایی کل هستی به دست قدرت فناپذیر اوست و او بر**

**هر چه اراده فرماید تواناست. سوره ی ملک آیه ی ۱**

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نسیم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند....

امیر سیفی

دی ماه ۱۳۹۲

## چکیده

نظر به افزایش تقاضای جهانی برای انرژی‌های پاک و کاهش هزینه‌ی پانل‌های فتوولتاییک، تولید پراکنده به‌وسیله‌ی آرایه‌های فتوولتاییک طی دهه‌ی گذشته افزایش چشمگیری داشته است. این سیستم‌ها به شکل مستقل از شبکه‌ی قدرت و یا متصل به آن اجرا می‌شوند. با توسعه‌ی دانش در این حوزه، جبران و کنترل توان راکتیو و هارمونیک‌های جریان ناشی از بارهای خطی و غیرخطی متصل به شبکه محقق شده است. این حقیقت که یک سیستم درعین حال دو کاربرد متفاوت تغذیه‌ی بارهای متناوب و فیلتر اکتیو را ارائه دهد، بسیار جذاب است. بر این مبنا در این پایان‌نامه یک سیستم فتوولتاییک که به‌وسیله‌ی اینورتر PWM سه فاز به شبکه متصل شده است و بر مبنای نظریه مرجع همزمان (dqo) کنترل می‌شود، ارائه شده است. سیستم مورد اشاره در محیط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شده است. از الگوریتم‌های هوشمند GA و PSO جهت استخراج مدل الکتریکی آرایه‌ی فتوولتاییک استفاده شده است. با استفاده از الگوریتم ردیاب نقطه‌ی کار بهینه، سیستم همواره در نقطه‌ی بهینه عمل می‌کند، الگوریتم‌های ادمیتانس افزایشی، P&O، بالا رفتن از تپه و فازی شبیه‌سازی و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با استفاده از ساختار فیلتر هیبرید متشکل از فیلتر اکتیو فتوولتاییک موازی و فیلتر پسیو موازی، سطح توان اینورتر و هزینه‌ی جبران‌سازی کاهش یافته است. در راستای بهبود عملکرد سیستم پیشنهادی پارامترهای این فیلتر هیبرید به کمک الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده‌اند. این سیستم استاندارد IEEE519 را می‌گذراند و THD جریان آن کمتر از ۰.۵٪ است.

**کلیدواژه‌ها:** تخمین پارامتر، توان راکتیو، فتوولتاییک، فیلتر هیبرید، هارمونیک جریان.

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست علائم و نشانه‌ها.....	د
فهرست جدول‌ها.....	و
فهرست شکل‌ها.....	ز
<b>فصل ۱- مقدمه</b> .....	۱
۱-۱- پیشگفتار.....	۱
۱-۲- انرژی خورشید.....	۱
۱-۳- هارمونیک‌های جریان در سیستم قدرت.....	۲
۱-4- منابع جریان و ولتاژ هارمونیکی.....	۲
۱-۵- هدف از این پروژه.....	۵
<b>فصل ۲- ردیابی نقطه کار حداکثر توان</b> .....	۷
۱-۲- مقدمه.....	۷
۲-۲- شرح مسئله.....	۷
۲-۳- روش بالا رفتن از تپه (HC) و روش انحراف و مشاهده (P&O).....	۸
۲-۴- روش ادمیتانس افزایشی.....	۱۰
۲-۵- روش نسبت ولتاژ مدار باز.....	۱۲
۲-6- روش نسبت جریان اتصال کوتاه.....	۱۳
۲-۷- روش کنترل بر مبنای منطق فازی.....	۱۳
۲-۸- روش شبکه عصبی.....	۱۵
۲-۹- روش کنترل همبستگی ریپل (RCC).....	۱۶
۲-۱۰- روش جاروب جریان.....	۱۷
۲-۱۱- کنترل افت ولتاژ خازن پیوند DC.....	۱۸
۲-۱۲- روش بیشینه‌سازی ولتاژ و یا جریان بار.....	۱۸
۲-۱۳- کنترل پس‌خور $dp/di$ یا $dp/dv$ .....	۱۹
۲-۱۴- دیگر روش‌های MPPT.....	۱۹
۲-۱۵- بحث.....	۲۰
۲-۱۵-۱- اجرا.....	۲۱
۲-۱۵-۲- حس‌گرها.....	۲۱
۲-۱۵-۳- چندین بیشینه‌ی محلی.....	۲۱
۲-۱۵-۴- هزینه‌ها.....	۲۱

۲۲	۱۶-۲- شبیه‌سازی و مقایسه‌ی روش‌های ردیاب نقطه‌ی بیشینه‌ی توان
۲۲	۱-۱۶-۲- سیستم مورد مطالعه
۲۳	۱۷-۲- نتایج شبیه‌سازی
۲۴	۱۸-۲- نتیجه‌گیری
۲۵	<b>فصل ۳- فیلترهای اکتیو</b>
۲۵	۱-۳- مقدمه
۲۸	۲-۳- ساختارها
۲۸	۱-۲-۳- گروه‌بندی بر مبنای مبدل
۳۰	۲-۲-۳- گروه‌بندی بر اساس توپولوژی
۳۲	۳-۲-۳- گروه‌بندی بر اساس سیستم تغذیه
۳۳	۱-۳-۲-۳- فیلترهای اکتیو دوسیمه
۳۴	۲-۳-۲-۳- <b>فیلترهای اکتیو سه سیمه</b>
۳۴	۳-۳-۲-۳- فیلترهای اکتیو چهارسیمه
۳۶	۳-۳- راهبردهای کنترل
۳۶	3-3-1- آراینده‌ی سیگنال
۳۷	3-3-2- استخراج سیگنال‌های مرجع جبران ساز
۳۷	۱-۲-۳-۳- جبران سازی در حوزه‌ی فرکانس
۳۷	۲-۲-۳-۳- جبران سازی در حوزه‌ی زمان
۳۸	۳-۳-۳- تولید سیگنال‌های گیت برای المان‌های کلید زنی فیلتر اکتیو
۳۸	۴-۳-۳- انتخاب المان‌ها و ویژگی‌های افزوده‌ی فیلترهای اکتیو
۳۹	۴-۳- ملاحظات فنی و اقتصادی
۴۰	<b>فصل ۴- تخمین پارامترهای الکتریکی آرایه‌های فتوولتاییک</b>
۴۰	۱-۴- مقدمه
۴۱	۲-۴- مدل ریاضی آرایه‌ی فتوولتاییک
۴۱	۱-۲-۴- مدل سلول ایده‌آل
۴۱	۲-۲-۴- مدل آرایه‌ی واقعی فتوولتاییک
۴۲	۳-۴- الگوریتم اجتماع ذرات (PSO)
۴۳	۴-۴- الگوریتم ژنتیک (GA)
۴۴	۵-۴- شبیه‌سازی
۵۰	۶-۴- تخمین پارامترهای الکتریکی پانل آریا سولار
۵۳	۷-۴- نتیجه‌گیری
۵۴	<b>فصل ۵- فیلتر هیبرید فتوولتاییک با پارامترهای پسیو بهینه</b>
۵۴	5-1- مقدمه
۵۶	۲-۵- مشکلات کیفیت توان در شبکه توزیع مبتنی بر فتوولتاییک

۵۷.....	۳-۵- ردياب نقطه‌ی کار بهينه.....
۵۸.....	۴-۵- ساختار کنترل کننده.....
۶۰.....	۵-۵- مدل‌سازی ریاضی مسئله طراحی فیلتر پسو.....
۶۱.....	۱-۵-۵- جبران سازی توان راکتیو.....
۶۱.....	۲-۵-۵- تابع توزیع هارمونیک کل.....
۶۲.....	۳-۵-۵- تابع هزینه.....
۶۲.....	۶-۵- شبیه‌سازی.....
۶۸.....	۷-۵- نتیجه‌گیری.....
۷۰.....	فهرست مراجع.....
۷۵.....	واژه نامه فارسی به انگلیسی.....
۷۶.....	واژه نامه انگلیسی به فارسی.....



## فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
جریان متناوب	AC
فیلتر اکتیو	AF
فیلتر اکتیو قدرت	APF
آراینده‌ی کیفیت توان اکتیو	APQC
آراینده‌ی توان خط اکتیو	APLC
درایو با سرعت قابل تنظیم	ASD
روش بهترین ولتاژ ثابت شده	BFV
ترانزیستورهای اتصال دوقطبی	BJT
اینورتر منبع جریانی	CSI
ترانسفورماتور جریان	CSI
جریان مستقیم	DC
تولید پراکنده	DG
پردازنده‌ی سیگنال دیجیتال	DSP
نسبت تبدیل	Duty ratio
سازمان رابط صنعت فتوولتائیک اروپا	EPIA
الگوریتم ژنتیک	GA
تریستورهای خاموش شونده با گیت	GTO
روش بالا رفتن از تپه	HC
سیستم‌های جریان مستقیم ولتاژ بالا	HVDC
آژانس بین‌المللی انرژی	IEA
ترانزیستور دو قطبی با گیت عایق	IGBT
جبران‌ساز لحظه‌ای توان راکتیو	IRPC
روش بازآرایی هماهنگ خطی	LRCM
نقطه‌ی بیشینه‌ی توان	MPP
ردیاب نقطه‌ی بیشینه‌ی توان	MPPT
ترانزیستور اثر میدان	MOSFET
کنترل یک مرحله‌ای	OCC
نقطه‌ی اتصال مشترک	PCC
کنترل انتگرالی تناسبی	PI
روش مشاهده‌ی انحراف	P&O

PPF	فیلتر توان پسیو
PV	فتوولتاییک
PT	ترانسفورماتور ولتاژ
PWM	مدولاسیون پهنای باند
RPF	فیلتر پسیو رزونانسی
SHAPF	فیلتر اکتیو موازی
SHHAPF	فیلتر اکتیو هیبرید موازی
SIT	ترانزیستور القای استاتیک
SRF	مرجع همزمان
STC	شرایط آزمون استاندارد
UPS	منبع تغذیه بی وقفه
VSI	اینورتر منبع ولتاژی

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۹	جدول ۱-۲ خلاصه‌ی الگوریتم HC و P&O [۱۲].....
۱۵	جدول ۲-۲ قوانین پایه‌ی کنترل فازی [۳۴].....
۲۲	جدول ۳-۲ مشخصات آرایه‌ی فتوولتائیک.....
۴۰	جدول ۱-۴ مشخصات آرایه‌ی تحت آزمایش.....
۴۵	جدول ۲-۴ مشخصات الگوریتم‌های GA و PSO.....
۴۵	جدول ۳-۴ حدود فضای جستجو.....
۴۶	جدول ۴-۴ نتایج خروجی الگوریتم‌های GA و PSO.....
۵۱	جدول ۵-۴ مشخصات پانل AS_M200.....
۵۱	جدول ۶-۴ مقادیر مدل الکتریکی پانل AS_M200.....
۶۰	جدول ۱-۵ ضرایب کنترلر PI.....
۶۳	جدول ۲-۵ مهم‌ترین مشخصات سیستم.....
۶۳	جدول ۳-۵ ضرایب تابع هزینه [۷۸].....
۶۴	جدول ۴-۵ مقادیر بهینه‌ی فیلتر پسیو حاصل از کد ژنتیک.....

## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ یکسو کننده‌ی دیودی سه فاز با بار سلفی. (الف) مدار قدرت، (ب) مدار معادل تک فاز برای ولتاژ و جریان هارمونیک، (ج) مدار ساده‌شده [۱۱].	۳
شکل ۲-۱ یکسو کننده‌ی خازنی سه فاز با بار خازنی. (الف) مدار قدرت، (ب) مدار معادل تک فاز برای ولتاژ و جریان هارمونیک، (ج) تبدیل معادل میان منبع ولتاژ و منبع جریان، (د) مدار ساده‌شده با فرض $Ls \ll Lc$ [۱۱].	۵
شکل ۱-۲ تعداد کل مقالات MPPT از سال ۱۹۶۸ [۱۲].	۷
شکل ۲-۲ منحنی مشخصه‌ی توان آرایه‌ی PV [۱۲].	۸
شکل ۳-۲ همگرایی روش HillClimbing/P&O به نقطه‌ی MPPT [۱۲].	۱۰
شکل ۴-۲ فلوجارت الگوریتم اندوکتانس افزایشی [۱۶].	۱۱
شکل ۵-۲ تابع عضویت ورودی‌ها و خروجی‌های کنترل کننده‌ی منطق فازی.	۱۵
شکل ۶-۲ شماتیک سیستم ردیاب نقطه‌ی بیشینه‌ی توان.	۲۲
شکل ۷-۲ مشخصه‌ی جریان خروجی الگوریتم‌های ردیاب مورد بررسی.	۲۳
شکل ۸-۲ مشخصه‌ی ولتاژ خروجی الگوریتم‌های ردیاب مورد بررسی.	۲۳
شکل ۹-۲ مشخصه‌ی توان خروجی الگوریتم‌های ردیاب مورد بررسی.	۲۴
شکل ۱-۳ فیلتر اکتیو موازی تغذیه‌شده با جریان.	۲۸
شکل ۲-۳ فیلتر اکتیو موازی تغذیه‌شده یا ولتاژ.	۲۹
شکل ۳-۳ فیلتر اکتیو سری.	۲۹
شکل ۴-۳ بهبوددهنده‌ی یکپارچه‌ی کیفیت توان (UPQC).	۳۰
شکل ۵-۳ فیلتر هیبرید به‌عنوان ترکیبی از فیلتر اکتیو سری و فیلتر پسیو موازی.	۳۱
شکل ۶-۳ فیلتر اکتیو سری دوسیمه‌ی تغذیه‌شده با ولتاژ.	۳۲
شکل ۷-۳ فیلتر اکتیو دو سیمه با مبدل تغذیه‌شده با جریان.	۳۲
شکل ۸-۳ بهبوددهنده‌ی دوسیمه‌ی یکپارچه‌ی کیفیت توان با مبدل تغذیه‌شده با جریان.	۳۳
شکل ۹-۳ فیلتر اکتیو چهارسیمه موازی با خازن توزیع‌شده.	۳۵
شکل ۱۰-۳ فیلتر اکتیو موازی چهار سیمه چهار پل.	۳۵
شکل ۱۱-۳ فیلتر اکتیو سه پل چهارسیمه.	۳۶
شکل ۱-۴ مدار معادل آرایه‌ی فتوولتاییک [۷۴].	۴۲
شکل ۲-۴ منحنی تغییرات P-V آرایه PV حین جستجوی متغیرها توسط الگوریتم GA در شرایط STC	۴۶
شکل ۳-۴ نمایش همگرایی نقاط یافته شده توسط الگوریتم GA به نقاط حاصل از آزمایش عملی در STC و نمایش صحت عملکرد مدل در دیگر شرایط.	۴۶

شکل ۴-۴ منحنی تغییرات P-V آرایه PV با پارامترهای یافته شده توسط الگوریتم GA در شرایط متفاوت دمایی ..... ۴۷

شکل ۴-۵ منحنی I-V آرایه PV با پارامترهای یافته شده توسط الگوریتم GA در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  و تابش متغیر ..... ۴۷

شکل ۴-۶ منحنی P-V آرایه PV با پارامترهای یافته شده توسط الگوریتم GA در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  و تابش متغیر ..... ۴۸

شکل ۴-۷ نمایش همگرایی نقاط یافته شده توسط الگوریتم PSO به نقاط حاصل از آزمایش عملی در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  و نمایش صحت عملکرد مدل در دیگر دماها ..... ۴۸

شکل ۴-۸ منحنی تغییرات P-V آرایه PV با پارامترهای یافته شده توسط الگوریتم PSO در شرایط متفاوت دمایی ..... ۴۹

شکل ۴-۹ منحنی I-V آرایه PV با پارامترهای یافته شده توسط الگوریتم PSO در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  و تابش متغیر ..... ۴۹

شکل ۴-۱۰ منحنی P-V آرایه PV با پارامترهای یافته شده توسط الگوریتم PSO در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  و تابش متغیر ..... ۵۰

شکل ۴-۱۱ منحنی جریان-ولتاژ حین جستجوی مقادیر مدل ..... ۵۱

شکل ۴-۱۲ منحنی توان-ولتاژ حین جستجوی مقادیر مدل ..... ۵۲

شکل ۴-۱۳ منحنی جریان-ولتاژ بهینه ..... ۵۲

شکل ۴-۱۴ منحنی توان-ولتاژ بر اساس مقادیر مدل ..... ۵۲

شکل ۵-۱ شماتیک سیستم فیلتر اکتیو PV مورد بررسی ..... ۵۵

شکل ۵-۲ فلوجارت الگوریتم ردیاب نقطه‌ی بیشینه توان HC ..... ۵۸

شکل ۵-۳ نمایش بلوکی روش کنترل بر مبنای تبدیل [۹۱]dqo ..... ۵۹

شکل ۵-۴ نمایش شماتیک بار غیرخطی یکسو ساز ..... ۶۳

شکل ۵-۵ منحنی تغییرات توان خروجی آرایه‌ی فتوولتاییک با تغییر در سطوح تابش ..... ۶۴

شکل ۵-۶ (الف) جریان سه فاز و (ب) توان اکتیو کشیده شده از شبکه در شرایط تابش متغیر و حضور فیلتر اکتیو فتوولتاییک ..... ۶۴

شکل ۵-۷ (الف) جریان سه فاز و (ب) توان اکتیو کشیده شده از شبکه در شرایط تابش متغیر و حضور فیلتر هیبرید فتوولتاییک ..... ۶۵

شکل ۵-۸ (الف) توان راکتیو و (ب) ضریب توان شبکه در شرایط تابش متغیر و حضور فیلتر اکتیو فتوولتاییک ..... ۶۵

شکل ۵-۹ (الف) توان راکتیو و (ب) ضریب توان شبکه در شرایط تابش متغیر و حضور فیلتر هیبرید فتوولتاییک ..... ۶۶

شکل ۵-۱۰ جریان بار، شبکه و خروجی اینورتر فیلتر اکتیو فتوولتاییک در فاز a ..... ۶۶

شکل ۵-۱۱ جریان بار و فیلتر پسیو، شبکه و خروجی اینورتر فیلتر هیبرید فتوولتاییک در فاز a ..... ۶۷

شکل ۵-۱۲ تحلیل فوریه‌ی هارمونیک‌های (الف) جریان بار (ب) جریان منبع در حضور فیلتر اکتیو فتوولتاییک (ج) جریان منبع در حضور فیلتر هیبرید فتوولتاییک و بار غیرخطی در شرایط STC.....۶۸

## فصل ۱ - مقدمه

### ۱-۱ - پیشگفتار

با گران شدن روزافزون سوخت‌های فسیلی و افزایش نگرانی‌ها در مورد افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای، منابع تجدید پذیر انرژی از جمله باد و خورشید توجه زیادی را به خود جلب نموده‌اند. در زمینه‌ی انرژی باد تحقیقات و سرمایه‌گذاری بسیاری انجام شده است و هم اکنون یکی از منابع اصلی تأمین انرژی پاک می‌باشد. در حال حاضر انرژی خورشید به‌عنوان منبعی پاک و بی‌پایان در رأس توجه پژوهشگران و سرمایه‌گذاران قرار دارد.

نیروگاه‌های خورشیدی به دو شکل متمرکز حرارتی و فتوولتاییک احداث می‌شوند که نوع فتوولتاییک به دلیل قابلیت نصب در توان‌های مختلف و انعطاف‌پذیری بالا محبوبیت زیادی دارد.

### ۱-۲ - انرژی خورشید

در آینده‌ی نزدیک، انتظار می‌رود که تقاضا برای انرژی الکتریکی، به دلیل افزایش جمعیت جهان و پدیده‌ی صنعتی شدن، به‌سرعت افزایش یابد. این افزایش در تقاضا برنامه‌هایی برای افزایش در تولید را می‌طلبد. مطالعات جدید پیش‌بینی می‌کنند که تولید در شبکه‌ی جهانی برق از ۱۷.۳ تریلیون کیلووات ساعت در سال ۲۰۰۵ به ۲۴/۴ تریلیون کیلووات ساعت در سال ۲۰۱۵ (۴۱٪ افزایش) و ۳۳/۳ تریلیون کیلووات ساعت در سال ۲۰۳۰ (افزایش ۹۲/۵٪) برسد [۱]. هم اکنون بخش قابل‌توجهی از برق مورد نیاز از سوختن سوخت‌های فسیلی، بخصوص زغال‌سنگ به دلیل ارزان بودن، تولید می‌شود. افزایش کاربرد سوخت‌های فسیلی در تولید انرژی عامل بخش بزرگی از آلودگی‌های زیست‌محیطی و آزادسازی گازهای گلخانه‌ای است، که دلیل اصلی پدیده‌ی گرم شدن زمین است. برای مثال، انتظار می‌رود با افزایش تولید انرژی در سال ۲۰۲۰، کربن دی‌اکسید و جیوه‌ی آزادشده در طبیعت به ترتیب ۳۵٪ و ۸٪ افزایش یابد. به‌علاوه کاهش منابع فسیلی و قیمت ناپایدار نفت دو نگرانی عمده‌ی کشورهای صنعتی هستند [۲].

برای غلبه بر مشکلات تولید برق از منابع فسیلی، منابع انرژی تجدید پذیر می‌توانند در ترکیب منابع انرژی جای‌گیرند. یکی از منابع انرژی تجدید پذیری که می‌تواند برای رسیدن به این هدف استفاده شود انرژی خورشید است. این انرژی طی فرآیند فتوولتاییک به برق پاک تبدیل می‌شود. بسیاری از سازمان‌ها آینده‌ی درخشانی را برای این منبع انرژی متصورند. برای مثال، سازمان رابط صنعت فتوولتاییک اروپا (EPIA<sup>۱</sup>) پیش‌بینی می‌کند که ظرفیت فتوولتاییک نصب‌شده در جهان تا سال ۲۰۲۰ به ۲۰۰ GW و تا سال ۲۰۳۰ به ۸۰۰ GW برسد [۳]. بر اساس تحقیقات اخیر آژانس بین‌المللی انرژی (IEA<sup>۲</sup>) ۲/۲۶ GW از ظرفیت PV نصب‌شده در کشورهای عضو این سازمان در سال ۲۰۰۷ بوده است. که افزایش ۵۰٪

<sup>۱</sup> European Photovoltaic Industry Association

<sup>۲</sup> International Energy Agency

نسبت به سال قبل از آن را نمایش می‌دهد، و ظرفیت نصب‌شده در این کشورها را به  $7/8$  GW رسانده است [۴].

سیستم‌های PV در سه کاربرد اصلی استفاده می‌شوند:

(۱) تأمین انرژی مورد نیاز ماهواره‌ها و کاربردهای فضایی  
(۲) سیستم‌های مستقل از شبکه، برای تغذیه‌ی بارهای دورافتاده که امکان اتصال آنها به شبکه وجود ندارد.

(۳) کاربردهای متصل به شبکه، به طوری که علاوه بر تأمین بارهای محلی به شبکه توان تزریق شود. با وجود افزایش استفاده از سیستم‌های  $PV^1$ ، هزینه سرمایه‌ی بالای مورد نیاز مانعی بزرگ برای رشد آنهاست، که بر روی قیمت کیلووات ساعت انرژی تولیدی آنها اثرگذار است. با به کارگیری فناوری نوین در ساخت سلول‌های خورشیدی و نیز تشویق مصرف‌کنندگان به نصب آنها می‌توان بر این مشکل غلبه کرد [۵].

### ۱-۳- هارمونیک‌های جریان در سیستم قدرت

در هر سیستم قدرت، وجود بارهای غیرخطی مانند یک‌سوسازهای دیودی و تریستوری، مبدل‌های سوئیچینگ، درایورهای کنترل سرعت، مبدل‌های فرکانسی و ماشین‌های الکتریکی به دلیل تزریق جریان‌های هارمونیک به سیستم قدرت موجب کاهش کیفیت توان سیستم می‌شوند. این جریان‌های هارمونیک باعث پیدایش مشکلات زیادی از جمله کاهش ضریب توان، عملکرد نامتعادل، آسیب رساندن به تجهیزات و کاهش راندمان سیستم می‌گردند [۸]. هارمونیک‌های جریان به دلیل ایجاد افت ولتاژ بر روی عناصر سیستم موجب عملکرد ناخواسته تجهیزات الکتریکی حساس و ادوات حفاظتی شده و ترانسفورماتورها را دچار اضافه‌بار، افزایش دما و تنش‌های حرارتی می‌نمایند. عواملی چون هارمونیک‌های تزریقی تولید توان راکتیو، عدم تعادل و جریان زمین بیش از اندازه باعث کاهش راندمان و ضریب توان سیستم می‌شوند [۹]. به دلیل ایجاد مشکلات فراوان ناشی از وجود هارمونیک‌ها در سیستم‌های قدرت دارای بارهای غیرخطی، انواع مختلف فیلترهای هارمونیک از جمله فیلترهای پسیو [۱۰]، فیلترهای اکتیو [۸ و ۹]، و فیلترهای ترکیبی یا هیبرید قدرت [۶ و ۷] به‌عنوان راه حل مقابله با هارمونیک‌ها توجه بسیاری را به خود جلب نموده‌اند. بر اساس استاندارد IEEE 519 هارمونیک جریان مجاز کمتر از ۵٪ است.

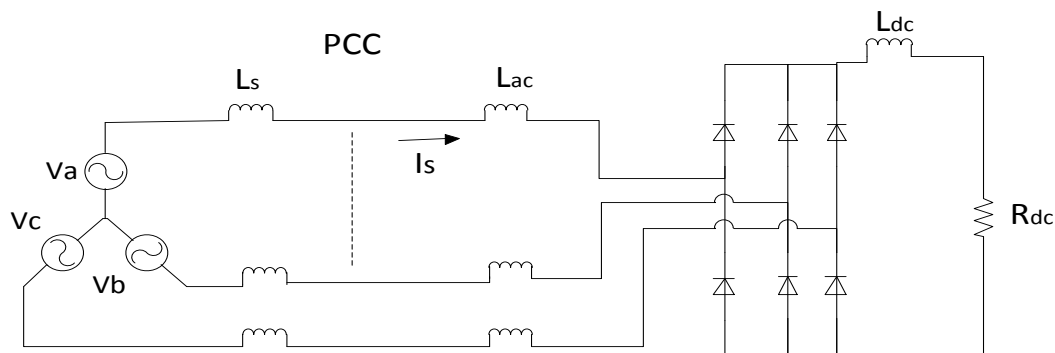
### ۱-۴- منابع جریان و ولتاژ هارمونیک

در اکثر موارد، از دیدگاه عملی می‌توان یک منبع جریان هارمونیک یا یک منبع ولتاژ هارمونیک را به‌عنوان یک بار مولد هارمونیک در نظر گرفت.

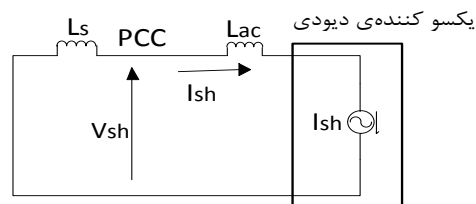
<sup>1</sup> PhotoVoltaic



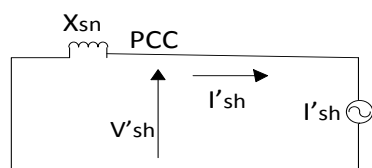
در شکل (۱-۱ الف) یک یکسو کننده دیودی سه فاز با بار سلفی نشان داده شده است. توجه نمایید که سلف<sup>۱</sup> DC،  $L_{dc}$  به طور مستقیم و سری به سمت DC یکسو کننده دیودی متصل شده است. در اینجا  $L_{dc}$  سلف DC موجود در سمت راست نقطه اتصال مشترک (PCC<sup>۲</sup>) می باشد. ممکن است این سلف به سمت AC<sup>۳</sup> یکسو کننده دیودی متصل شده باشد، و یا ممکن است سلف نشی ترانسفورماتور در سمت AC یکسو کننده نصب شده باشد تا تطبیق ولتاژ و یا ایزوله سازی الکتریکی را انجام دهد. توجه نمایید که این ترانسفورماتور در شکل ۱-۱ الف لحاظ نشده است. از طرف دیگر،  $L_s$  نشان دهنده سلف معادل ساده شده سیستم قدرت در سمت چپ PCC می باشد. در اکثر موارد مقدار سلف  $L_s$  بسیار کوچک تر از  $L_{ac}$  است. به عبارت دیگر ظرفیت اتصال کوتاه در سمت چپ PCC بسیار بزرگ تر از ظرفیت اتصال کوتاه در سمت راست PCC می باشد زیرا  $L_s$  بسیار کوچک بوده و ممکن است از آن صرف نظر شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱-۱ یکسو کننده دیودی سه فاز با بار سلفی. (الف) مدار قدرت، (ب) مدار معادل تک فاز برای ولتاژ و جریان هارمونیک، (ج) مدار ساده شده [۱۱].

از آنجایی که در بسیاری از موارد مقدار سلف  $L_{dc}$  بزرگ تر از  $L_{ac}$  است، شکل موج  $i_{sh}$  مستقل از  $L_{ac}$  است. این نکته موجب می شود در زمانی که توجه به ولتاژ و جریان هارمونیک معطوف می باشد، یکسو کننده به عنوان منبع جریان هارمونیک در نظر گرفته شود. این موضوع در شکل ۱-۱ ب نشان داده

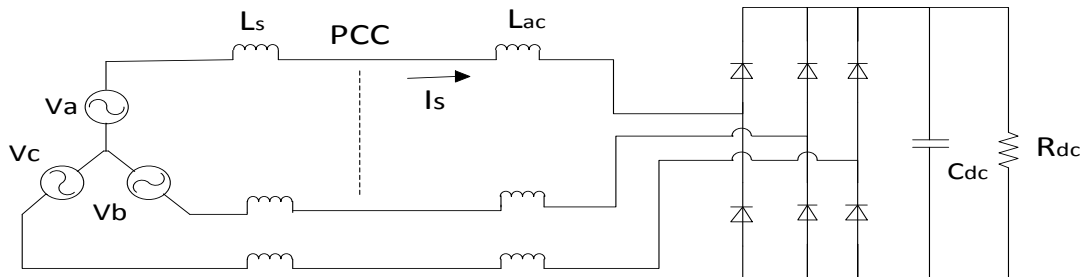
<sup>۱</sup> Direct Current

<sup>۲</sup> Point of Common Coupling

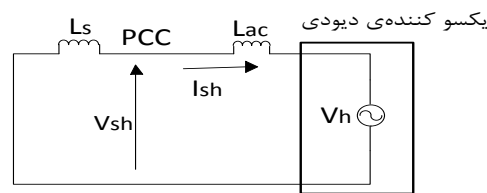
<sup>۳</sup> Alternative Current

شده است. اکیداً بیان می‌شود که شکل موج جریان به دلیل اثری که " اثر هم‌پوشانی جریان<sup>۱</sup> " نامیده می‌شود، تا زمانی که  $L_{ac}$  صفر نشود به میزان کمی تحت تأثیر اندوکتانس AC قرار دارد. توجه شود که سلف سیستم ( $L_s$ ) نقشی اساسی در تولید ولتاژ هارمونیک در PCC بازی می‌کند در حالی که سلف AC ( $L_{ac}$ ) نقشی ندارد.

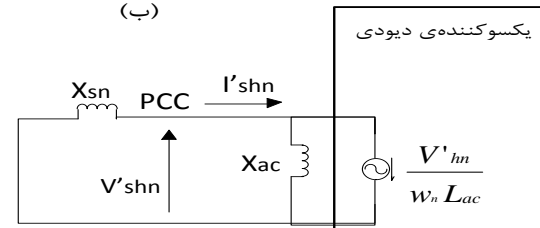
در شکل ۱-۱ مدار ساده‌شده حاصل از شکل ۱-۱ب نشان داده شده است که در آن  $i_{shn}$  جریان لحظه‌ای نیست بلکه جریان موثر در فرکانس هارمونیک مرتبه  $n$ ام است، و همچنین  $L_{ac}$  در منبع جریان هارمونیک پنهان است. ضرب راکتانس سیستم ( $X_{sh}$ ) (در فرکانس هارمونیک مرتبه  $n$ ام) در جریان هارمونیک ( $i_{shn}$ )، مقدار موثر ولتاژ هارمونیک مرتبه  $n$ ام ( $V'_{shn}$ ) ظاهر شده در PCC را نتیجه می‌دهد [۱۱].



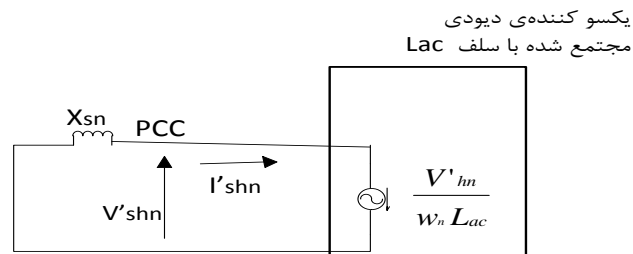
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

<sup>1</sup> Current Overlap Effect

شکل ۱-۲ یکسو کننده‌ی خازنی سه فاز با بار خازنی. (الف) مدار قدرت، (ب) مدار معادل تک فاز برای ولتاژ و جریان هارمونیک، (ج) تبدیل معادل میان منبع ولتاژ و منبع جریان، (د) مدار ساده شده با فرض  $Ls \ll Lac$  [۱۱].

در شکل ۱-۲ الف یک یکسو کننده دیودی سه فاز با بار خازنی نشان داده شده است. بر خلاف شکل ۱-۱ الف، خازن DC (Cdc) به طور مستقیم و موازی به سمت DC یکسو کننده دیودی متصل شده است. در نتیجه یکسو کننده دیودی را از دید سمت AC می‌توان به عنوان منبع ولتاژ هارمونیک (Vh) در نظر گرفت. این موضوع در شکل ۱-۲ ب نشان داده شده است. توجه نمایید که توصیف شکل موج Vh مشکل می‌باشد، زیرا is یک شکل موج ناپیوسته بوده و همچنین بازه هدایت هر دیود از میان پارامترهای مدار به Lac بستگی دارد. دلیل اینکه چرا یکسو کننده را می‌توان به عنوان منبع ولتاژ هارمونیک در نظر گرفت این است که امپدانس هارمونیک در سمت راست ترمینال‌های AC یکسو کننده بسیار کوچک‌تر از امپدانس هارمونیک در سمت چپ ترمینال‌های AC می‌باشد. این بدان معنی است که جریان هارمونیک منبع (ish) به شدت تحت تأثیر سلف AC (Lac) قرار دارد. اگر Lac وجود نداشته باشد، یکسو کننده جریان ضربه‌ای دارای اعوجاجی با مقدار پیک بسیار بزرگ از شبکه AC خواهد بود، زیرا تنها سلف سیستم (Ls) که در بسیاری از موارد بسیار کوچک است، جریان هارمونیک را محدود خواهد کرد. با استناد به اصل "تبدیل معادل میان منبع ولتاژ و منبع جریان" می‌توان شکل ۱-۲ ج را از شکل ۱-۲ ب به دست آورد. در اینجا Ishn و Vshn به ترتیب جریان موثر و ولتاژ موثر در فرکانس هارمونیک مرتبه nام هستند. با فرض اینکه مقدار سلف Lac بسیار بزرگ‌تر از Ls باشد، می‌توان Lac را از شکل ۱-۲ ج حذف کرد. این مسئله باعث ساده شدن مدار می‌شود شکل ۱-۲ د. این نکته جالب توجه است که یکسو کننده دیودی شامل سلف AC (Lac)، زمانی که از سمت راست PCC دیده شود، یک منبع ولتاژ هارمونیک نیست بلکه یک منبع جریان هارمونیک است، هر چند که یکسو کننده دیودی خودش به عنوان یک منبع ولتاژ هارمونیک در نظر گرفته می‌شود [۱۱].

## ۱-۵- هدف از این پروژه

هدف از این پژوهش آنست که با تکیه بر انرژی پاک خورشید و استفاده از راه‌برد کنترل dqo برای اینورتر آرایه‌ی فتوولتاییک متصل به شبکه، به جبران توان راکتیو و هارمونیک‌های جریان پرداخته شود. از آنجایی که با افزایش سطح توان، هزینه‌ی المان‌های نیمه‌هادی بسیار افزایش می‌یابد تلاش شده است تا با کاربرد فیلترهای پسیو و با رسیدن به ساختار فیلتر هیبرید به کاهش هزینه‌های بهبود کیفیت توان، در کنار کاربرد اصلی پانل فتوولتاییک که تولید توان اکتیو است، برسد.

فصل اول مقدمه‌ای از انرژی خورشید و منابع تولید هارمونیک در شبکه‌ی قدرت است.

فصل دوم مروری جامع بر روش‌های تعقیب نقطه‌ی کار حداکثر توان آرایه‌های فتوولتاییک است و در انتها چند روش مطرح در این عرصه شبیه‌سازی و مقایسه شده‌اند.

فصل سوم به ساختارهای فیلتر اکتیو موجود از جنبه‌های گوناگون می‌پردازد.

در فصل چهارم بر نحوه‌ی مدل‌سازی ریاضی آرایه‌های فتوولتاییک و چگونگی استخراج پارامترهای الکتریکی آنها با استفاده از کدهای هوشمند، جهت استفاده در محاسبات و شبیه‌سازی، پرداخته شده است.

در فصل پنجم فیلتر اکتیو فتوولتاییک طراحی شده است و به کمک الگوریتم ژنتیک، پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PI آن بهینه‌سازی شده‌اند. سپس با استفاده از فیلتر پسیو و با دستیابی به ساختار فیلتر هیبرید فتوولتاییک، سعی شده است تا هزینه‌ی فیلترینگ کاهش و کیفیت آن افزایش یابد ضمن اینکه ظرفیت تولید توان اکتیو بیشتر می‌شود.