

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعت آب و برق
(شهید عباسپور)

دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)
دانشکده برق

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق
گرایش: قدرت-تجدید ساختار

طراحی بهینه اینورتر منبع جریان سیستم‌های فتوولتائیک غیر متمرکز مجهز به
سیستم MPPT جهت اتصال به شبکه توزیع

تحقیق و تدوین:

شهریار علیرضا زاده

استاد راهنما:

دکتر احمد سالم نیا

استاد مشاور:

مهندس اکبر رئوفی

استاد داور:

دکتر محمد آقا شفیعی

تیر ۱۳۹۰



دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)
دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق-قدرت (تجدید ساختار)
آقای شهریار علیرضازاده

تحت عنوان

طراحی بهینه اینورتر منبع جریان سیستم‌های فتوولتائیک غیر متمرکز مجهز به سیستم MPPT
جهت اتصال به شبکه توزیع

در تاریخ ۹۰/۷/۱۲ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- ۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر احمد سالم‌نیا
- ۲- استاد مشاور پایان نامه مهندس اکبر رئوفی
- ۳- استاد داور پایان نامه دکتر محمد آقا شفیعی
- ۴- استاد داور پایان نامه (خارجی) دکتر عبدالرضا رحمتی
- سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر حمید جوادی

به نام خدا

تعهد نامه اثر:

اینجانب شهریار علیرضازاده تأیید می کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه، حاصل کار پژوهشی اینجانب می باشد و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است.

این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح، پایین تر و بالاتر ارائه نشده است. کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) می باشد.

شهریار علیرضازاده

فهرست مطالب

چکیده.....	۱
فصل اول	
مقدمه ای بر سیستم های خورشیدی.....	۲
۱-۱- تقسیم بندی کل انرژی خورشید.....	۲
۲-۱- معرفی پدیده فتوولتائیک.....	۵
۳-۱- اجزا سیستم های فتوولتائیک.....	۶
۱-۳-۱- سلول های خورشیدی.....	۶
۲-۳-۱- ماژول ها.....	۹
۳-۳-۱- آرایه ها.....	۹
۴-۳-۱- رگولاتور ولتاژ و کنترل کننده ها.....	۱۱
۱-۴-۳-۱- اینورترها.....	۱۱
۳-۴-۲- سیستم کنترل.....	۱۱
۳-۴-۳-۱- تنظیم کننده نقطه توان حداکثر (MPPT).....	۱۱
۵-۳-۱- ذخیره سازی انرژی الکتریکی در باتری ها.....	۱۲
۴-۱- طبقه بندی سیستم های فتوولتائیک از لحاظ نحوه تامین بار مصرف کننده.....	۱۲
۵-۱- مزایای تولید الکتریسته با استفاده از سیستم های فتوولتائیک.....	۱۳
۶-۱- معایب استفاده از فتوولتائیک.....	۱۴
۷-۱- مروری بر کارهای انجام شده.....	۱۴
فصل دوم	
سلول و ماژول فتوولتائیک.....	۱۶
مقدمه.....	۱۶
۱-۲- مشخصات سلول ایده آل فتوولتائیک.....	۱۶
۱-۱-۲- ولتاژ مدار باز سلول.....	۱۸
۲-۱-۲- نقطه بیشینه توان (MPP).....	۱۸
۳-۱-۲- ضریب پر بودن (FF) و بازده سلول (η).....	۲۰
۲-۲- مدل واقعی سلول فتوولتائیک.....	۲۰
۱-۲-۲- مقاومت سری.....	۲۰
۲-۲-۲- مقاومت موازی.....	۲۱
۳-۲-۲- منحنی مشخصه سلول فتوولتائیک.....	۲۱

۲۱	.....۳-۲-ماژول های سیستم فتوولتائیک
۲۲	.....۱-۳-۲-بدست آوردن شاخص های ماژول
۲۳	.....۲-۳-۲-منحنی جریان برحسب ولتاژ و توان ماژول
۲۵	.....۴-۲-ردیابی نقطه بیشینه توان(MPPT)
۲۶	.....۱-۴-۲-MPPT براساس مبدل BUCK
۲۸	.....۲-۴-۲-MPPT براساس مبدل Boost
۲۹	.....۴-۲-نحوه اتصال ماژول ها به شبکه
۳۰	.....۱-۴-۲-اتصال از طریق اینورتر مرکزی (تک رشته ای)
۳۱	.....۲-۴-۲-اتصال از طریق میکرو اینورتر
۳۲	.....۳-۴-۲-بکارگیری ماژول های AC
۳۴	.....۵-۲-جمع بندی

فصل سوم

۳۵	.....تحلیل تئوری اینورتر برای اتصال مستقیم ماژول های ac سیستم فتوولتائیک به شبکه
۳۵	.....مقدمه
۳۵	.....۱-۳-اینورتر مناسب سیستم های فتوولتائیک
۳۸	.....۲-۳-اینورتر فلایبک منبع جریان
۳۹	.....۳-۳-تحلیل اینورتر
۴۴	.....۴-۳-بدست آوردن چگالی توان برای مد DCM
۴۸	.....۵-۳-تأثیر نسبت تبدیل ترانس
۴۹	.....۶-۴-دستور العمل طراحی برای انتقال چگالی توان بهینه
۵۱	.....۷-۳-تعیین مقادیر عددی با استفاده از دستور العمل طراحی
۵۲	.....۸-۳-جمع بندی

فصل چهارم

۵۳	.....شبیه سازی و طراحی مدار فرمان و مبدل اینورتر فلایبک
۵۳	.....مقدمه
۵۳	.....۱-۴-مدار فرمان MOSFET (S_1)
۵۰	.....۱-۲-۴-مدار یکسو ساز
۵۲	.....۲-۲-۴-ایجاد شکل موج مثلثی مرجع
۶۱	.....۳-۴-مدار فرمان کلیدهای S_2 و S_3 (IGBT ها)
۶۴	.....۴-۴-مدار جداساز و درایو
۶۶	.....۱-۴-۴-آی سی HCPL-316J
۶۲	.....۲-۴-۴-کنترل خروجی

۶۹ ۳-۴-۴-تشریح مدار جداساز و درایو

۷۰ ۵-۴- مدار تغذیه

۷۰ ۱-۵-۴- تشریح مدار تغذیه

۷۱ ۶-۴- خلاصه

فصل پنجم

۷۴ بررسی نتایج عملی، تئوری و شبیه سازی مدار قدرت

۷۴ مقدمه

۷۴ ۱-۵- بلوک دیاگرام مدار اینورتر

۷۵ ۲-۵- حفاظت کلیدهای مدار قدرت

۷۶ ۳-۵- شبیه سازی اینورتر

۷۶ ۴-۵- مقایسه نتایج شبیه سازی، تئوری و عملی

۷۸ ۱-۴-۵- توان انتقالی

۷۹ ۲-۴-۵- جریان خروجی

۸۱ ۱-۲-۴-۵- فیلتر کردن جریان خروجی

۸۴ ۲-۲-۴-۵- هارمونیک های جریان خروجی

۸۷ ۳-۴-۵- ضریب توان

۸۹ ۴-۴-۵- بازده اینورتر

۹۱ ۵-۵- جمع بندی

۹۲ فصل ششم (خلاصه و پیشنهادات)

۹۵ ضمیمه الف

۱۰۲ ضمیمه ب

۱۰۴ مراجع

فهرست شکل ها و نمودارها

- ۱-۱: انرژی خورشید..... ۴
- ۱-۲: هندسی سلول خورشیدی..... ۱۷
- ۲-۲: سلول ایده آل..... ۱۷
- ۳-۲: نمودار ولتاژ-جریان سلول ایده آل..... ۱۸
- ۴-۲: مدار معادل کلی سلول..... ۲۱
- ۵-۲: چگونگی تغییرات نمودار جریان-ولتاژ سلول واقعی..... ۲۲
- ۶-۲: منحنی ولتاژ-جریان ماژول..... ۲۴
- ۷-۲: منحنی ولتاژ-توان ماژول..... ۲۴
- ۸-۲: مبدل DC به DC..... ۲۵
- ۹-۲: اتصال سیستم فتوولتائیک را از طریق مبدل DC به DC به بار..... ۲۶
- ۱۰-۲: مدار اساسی مبدل باک..... ۲۷
- ۱۱-۲: مدار اساسی مبدل بوست..... ۲۸
- ۱۲-۲: ساختار سیستم با اینورتر تک رشته‌ای..... ۳۰
- ۱۳-۲: نحوه اتصال میکرو اینورترها به شبکه و ماژولها..... ۳۱
- ۱۴-۲: نما از زیر وبالای ماژول AC..... ۳۳
- ۱۵-۲: نحوه اتصال ماژولهای AC سیستم فتوولتائیک به شبکه..... ۳۳
- ۱-۳: مبدل فلائیک متصل شده به دو منبع ولتاژ..... ۳۶
- ۲-۳: عملکرد مبدل در مد شرایط گسسته..... ۳۷
- ۳-۳: (a) اینورتر با یک سیم پیچ ثانویه و کلید دو طرفه (b) چگونگی برقراری جریان در نیم سیکل مثبت و منفی..... ۳۷
- ۴-۳: اینورتر فلائیک، پل ماسفتی در ورودی و کلید دو طرفه در خروجی..... ۳۸
- ۵-۳: اینورتر فلائیک..... ۳۹
- ۶-۳: مدار معادل اینورتر فلائیک منبع جریان در دوره یک نیم سیکل شبکه..... ۴۰
- ۷-۳: مدار معادل اینورتر فلائیک منبع جریان در دوره یک نیم سیکل خط زمانی که S1 روشن است..... ۴۰
- ۸-۳: مدار معادل اینورتر فلائیک منبع جریان دوره زمانی که S1 خاموش است..... ۴۱
- ۹-۳: چگونگی جریان ترانسفورماتور برای حالت مد DCM..... ۴۱
- ۱۰-۳: بلوک دیاگرام مدار فرمانی مد DCM..... ۴۲

- ۳-۱۱: $(g_s/g_L)_{max}$ تابعی از n و λ برای مد DCM..... ۴۷
- ۳-۱۲: فلوجارت طراحی اینورتر..... ۵۰
- ۳-۱۳: نمودار حداکثر ولتاژی کلیدهای اولیه و ثانویه اینورتر بر اساس پارامترهای n و λ ۵۱
- ۴-۱: بلوک دیاگرام مدار فرمان ماسفت..... ۵۴
- ۴-۲: یکسو ساز پل..... ۵۴
- ۴-۳: مدار قدر مطلق گیر..... ۵۵
- ۴-۴: سمت چپ ورودی، راست خروجی مدار قدر مطلق گیر..... ۵۵
- ۴-۵: خروجی مدار قدر مطلق گیر..... ۵۶
- ۴-۶: نحوه اتصالات آی سی ICL8038 برای تولید موج های مختلف..... ۵۶
- ۴-۷: تولید موج PWM با استفاده از موج سینوسی و مثلثی..... ۵۸
- ۴-۸: مدار فرمان گیت ماسفت (سوئیچ S_1)..... ۵۸
- ۴-۹: موج های خروجی قدر مطلق گیر (Vc)، مولد موج مثلثی (Vf) و پالس PWM..... ۶۰
- ۴-۱۰ الف: پالس PWM خروجی مدار فرمان (پهنای پالس کوچک است)..... ۶۰
- ۴-۱۰ ب: پالس PWM خروجی مدار فرمان (پهنای پالس کوچک است)..... ۶۱
- ۴-۱۱: پالس PWM خروجی مدار فرمان (پهنای پالس بزرگ است)..... ۶۱
- ۴-۱۲: مدار فرمان S_2 ۶۲
- ۴-۱۳: ولتاژ پایه های مثبت، منفی و خروجی مدار فرمان S_2 ۶۳
- ۴-۱۴: تأخیر $0.7ms$ ایجاد شده توسط مقاومت های R_3 و R_4 ۶۳
- ۴-۱۵: مدار فرمان S_3 ۶۴
- ۴-۱۶: پالس کنترل سوئیچ های S_2 و S_3 ۶۵
- ۴-۱۷: پالس کنترل گیت سوئیچ های S_2 و S_3 در آزمایشگاه..... ۶۵
- ۴-۱۸: آی سی HCPL-316J..... ۶۸
- ۴-۱۹: مدار داخلی آی سی HCPL-316J..... ۶۷
- ۴-۲۰: مدار جداساز و درایور..... ۶۸
- ۴-۲۱: خروجی مدار جداساز و درایور در آزمایشگاه..... ۷۰
- ۴-۲۲: مدار شبیه سازی شده منبع تغذیه در نرم افزار پروتوس..... ۷۱
- ۴-۲۳: خروجی های مدار تغذیه..... ۷۲
- ۴-۲۴: مدار فرمان..... ۷۲
- ۴-۲۵: مدار جداساز و درایو..... ۷۳
- ۵-۱: مدار کلی اینورتر بصورت بلوک دیاگرام..... ۷۵
- ۵-۲: مدار حفاظت کلید S_1 ۷۵
- ۵-۳: مدار حفاظت کلیدهای طرف ثانویه..... ۷۶

- ۴-۵: مدار اینورتر آماده شبیه سازی ۷۷
- ۵-۵: توان انتقالی بصورت تابعی از dp (از پایین به بالا): آزمایشگاهی، شبیه سازی و تئوری ۷۹
- ۶-۵: جریان خروجی اینورتر قبل از فیلتر $(ILf+ICf)$ ۸۰
- ۷-۵: موج جریان خروجی قبل از فیلتر را در آزمایشگاه ۸۰
- ۸-۵: مدار معادل اینورتر، فیلتر و شبکه ۸۱
- ۹-۵: جریان خروجی اینورتر ۸۲
- ۱۰-۵: موج جریان خروجی که توسط دستگاه آنالیز توان اندازه گیری شده است. ۸۲
- ۱۱-۵: موج ولتاژ شبکه در نرم افزار ۸۳
- ۱۲-۵: موج ولتاژ آزمایشگاه ۸۳
- ۱۳-۵: هارمونیک حول فرکانس 40 kHz ۸۴
- ۱۴-۵: هارمونیک های موجود در جریان خروجی (FFT) آزمایشگاه ۸۶
- ۱۵-۵: FFT موج جریان خروجی در نرم افزار ۸۶
- ۱۶-۵: ضریب توان (PF) بصورت تابعی از $P_{AC}/P_{AC,max}$ ۸۸
- ۱۷-۵: بیشترین ضریب توان آزمایشگاهی ۸۹
- ۱۸-۵: نمودار بازده اینورتر به عنوان تابعی از ورودی (خروجی سیستم فتوولتائیک) ۹۰
- ۱۹-۵: مدار قدرت ۹۱

لیست جداول

- جدول ۴-۱: جدول کنترل آی سی HCPL-316J ۶۷
- جدول ۵-۱: نتایج عددی آزمایشگاهی توان انتقالی به عنوان تابعی از dp ۷۸
- جدول ۵-۲: ۱۰۰ هارمونیک اول جریان خروجی اینورتر ۸۵
- جدول ۵-۳: ضریب توان بصورت تابعی از درصد $P_{AC}/P_{AC,max}$ ۸۸
- جدول ۵-۴: بازده اینورتر به ازای ورودی‌های مختلف ۹۰

نمادها

BCM: مد مرزی پیوسته (مد بین پیوسته و گسسته)

CSF: فرکانس کلید زنی ثابت

DCM: مد شرایط گسسته

d: دوره زمانی کلیدهای اولیه

d_p : ضریب مدولاسیون

f_s : فرکانس کلید زنی

eff: بازده اینورتر

g_s : رسانایی منبع جریان

$g_L = 1/f_s L (\Omega^{-1})$: g_L

$i_s(t)$: تابع زمانی منبع جریان (آمپر)

$i_{dc}(t)$: تابع زمانی جریان اولیه ترانسفورمر (آمپر)

$i_{dc,p}(t)$: مقدار بیشینه جریان اولیه ترانسفورمر که برای یک دوره کلید زنی اتفاق می افتد (آمپر)

L1: اندوکتانس اولیه ترانسفورمر (μH)

N: نسبت تبدیل ترانسفورمر

Nac: تعداد دورهای ثانویه ترانسفورمر (طرف ac)

Ndc: تعداد دورهای اولیه ترانسفورمر (طرف سیستم فتوولتائیک)

Pac: توانی که به طرف شبکه انتقال می یابد (وات).

Pdc: توان طرف اولیه (وات).

pf: ضریب توان در طرف شبکه بعد از فیلتر

PV: سیستم فتوولتائیک

Ts: دوره کلید زنی کلید اولیه (ماسفت)

Thl: دوره زمانی خط یکسو شده (ثانیه)

t_{on} : مدت زمان روشن بودن کلید اولیه (ثانیه)
 $t_{on,p}$: دوره t_{on} از دوره کلید زنی که در $\omega = \pi/2$ اتفاق می افتد.
 t_{off} : زمان خاموش بودن کلید اولیه
 $u_{ac}(t)$: تابع زمانی ولتاژ شبکه (ولت)
 $V_{ac,p}$: مقدار بیشینه ولتاژ شبکه
 $V_{ac,rms}$: مقدار rms ولتاژ شبکه
 V_{dc} : مقدار ولتاژ سیستم فتوولتائیک در نقطه بیشینه کارکرد.
 $V_{S1,p}$: بیشینه فشار وارد بر کلید اولیه (ولت)
 $V_{S2,p}$: بیشینه فشار وارد بر کلید ثانویه (ولت)
 ω : جزء صحیح T_h/T_s
 λ : نسبت $V_{dc}/V_{ac,p}$
 $\theta = \omega t$
 ω : فرکانس زاویه‌ای اصلی (rad/s)

چکیده

از آنجایی که بسیاری از کشورها پیمان کیوتو که هدف آن کاهش گازهای گلخانه‌ای است را پذیرفته‌اند، که در این بین انرژی خورشیدی می‌تواند نقش مهمی را در کاهش گازهای آلوده کننده ایفا کند. سیستم‌های فتولتائیک برق مستقیم تولید می‌کنند بنابراین برای اتصال آنها به شبکه توزیع باید از اینورتر استفاده نمود. با توجه به اینکه در سیستم‌های فتولتائیک هزینه اینورتر یک سوم کل هزینه سیستم است، بنابراین صرفه جویی و طراحی بهینه سیستم اینورتر به مقدار قابل توجهی هزینه سیستم را کم می‌کند. در این پایان نامه به طراحی اینورتر مناسب برای سیستم‌های فتولتائیک پرداخته می‌شود.

ابتدا به این موضوع که اینورتر مناسب برای سیستم‌های فتولتائیک چه نوع اینورتری است پرداخته می‌شود. در ادامه به نوعی از اینورتر بنام اینورتر فلاپیک منبع جریان پرداخته می‌شود. این نوع اینورتر دارای بازده و ضریب توان مناسب جهت اتصال سیستم‌های فتولتائیک به شبکه توزیع می‌باشد. معادلات الکتریکی حاکم و بدست آوردن تمام مشخصه‌های الکتریکی این نوع اینورتر و اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد و طراحی اینورتر بیان می‌شود. و مقادیر عددی طراحی اینورتر بدست آورده می‌شود.

بخش مهمی از اینورتر مدار فرمان است. ضمن تشریح قسمت‌های مختلف مدار فرمان نحوه پیاده سازی آنها در عمل و نرم افزار بیان می‌شود. نحوه ایجاد پالس PWM و مدار فرمان گیت کلیدهای مختلف اینورتر و نحوه جداسازی و طراحی مدار تغذیه برای بایاس آی‌سی‌های مختلف بخش کنترل و درایور تشریح می‌شود.

سپس اینورتر طراحی شده شبیه سازی می‌شود و نتایج تئوری با نتایج شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی از نظر توان انتقالی، جریان خروجی، THD، ضریب توان و بازده با هم مقایسه می‌شوند.

فصل اول

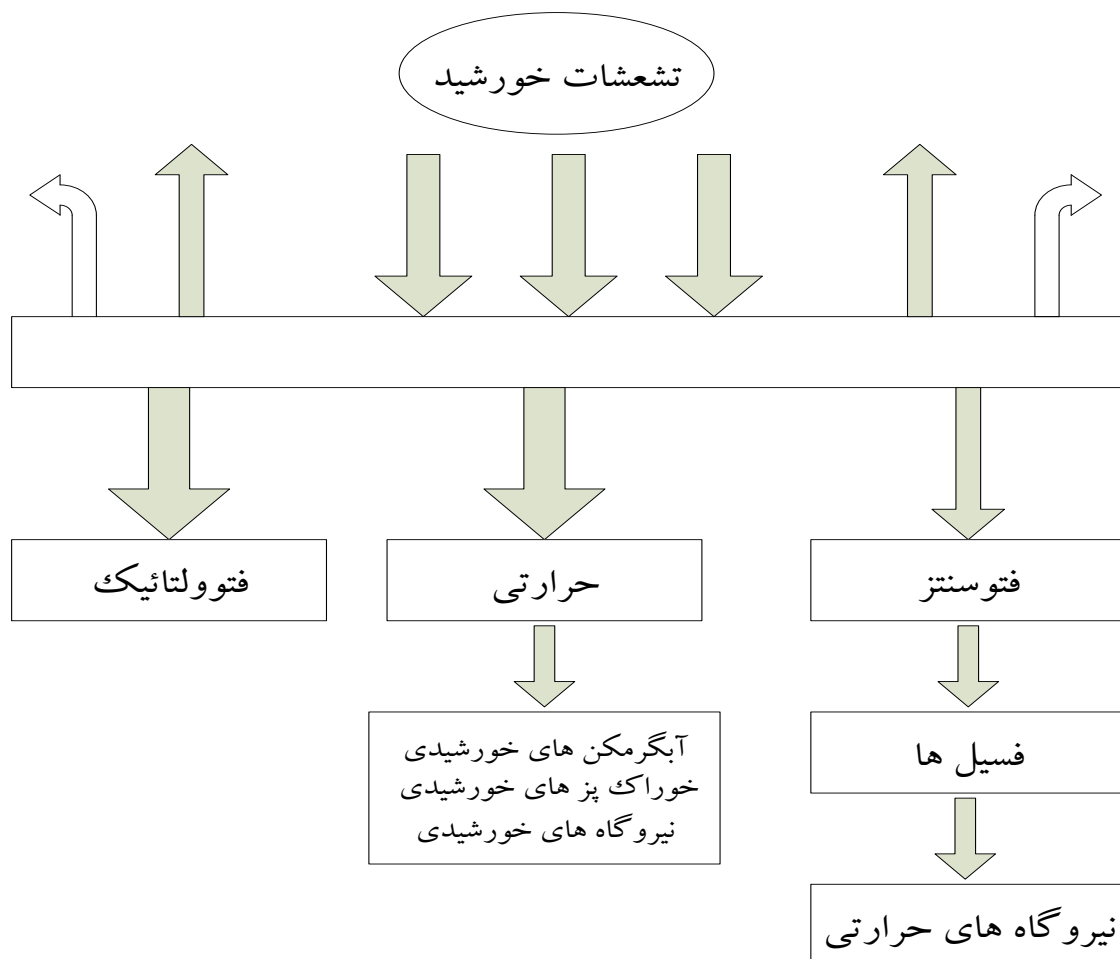
مقدمه‌ای بر سیستم‌های انرژی خورشیدی

مقدمه

انرژی خورشیدی بطور رایگان و بدون هیچگونه محدودیتی در همه نقاط جهان دریافت می‌شود. ساده‌ترین روش استفاده از انرژی خورشیدی تبدیل آن به انرژی حرارتی از طریق گردآورنده‌های حرارتی خورشیدی است. بسط و توسعه اولیه سیستم‌های انرژی خورشیدی بر روی تأمین انرژی لازم برای گرم کردن فضای ساختمان‌ها و تأمین آب گرم مورد نیاز، متمرکز شده بود. با این حال، تبدیل مستقیم نور خورشید به الکتریسیته نظر بسیاری از دانشمندان را برانگیخته نه تنها بخاطر اینکه این تکنولوژی می‌توانست به طور مؤثر از متمرکز کردن سیستم‌های تولید برق بکاهد، بلکه همچنین تولید برق از انرژی خورشیدی با هزینه اندک و با راندمان بالا همواره از خواست‌های بشر بوده است [۱].

۱-۱- تقسیم بندی کل انرژی خورشید

شکل (۱-۱) شکل‌های مختلف انرژی خورشید را نشان می‌دهد، مقدار تشعشعات خورشید حدود $10^{15} \times 2$ می‌باشد. بخشی از تشعشعات خورشید (حدود ۳۰٪) در جو زمین منعکس می‌شود، از مقدار توان فوق چیزی حدود ۲۲٪ برای تبخیر آب (اقیانوس‌ها، دریاها و...) استفاده می‌شود. بنابراین ۴۸٪ انرژی خورشید برای گرم کردن سطح زمین استفاده می‌شود که حدود ۵۶٪ در آن برای فتوسنتز بکار می‌رود که در نهایت به سوخت‌های فسیلی تبدیل می‌شود. مقدار کمی از این انرژی با یک سیال واسطه به حرارت تبدیل می‌شود که در آبگرم‌کن‌های خورشیدی، خوراک پزهای خورشیدی و... کاربرد دارد و قسمت بسیار مهم آن برای سیستم فتوولتائیک استفاده می‌شود که در ادامه بطور مفصل به آن می‌پردازیم.



شکل ۱-۱: انواع انرژی خورشید

اغلب سفینه های فضایی و ماهواره هائی که از دهه ۱۹۵۰ میلادی تاکنون به فضا فرستاده شده اند، قدرت مورد نیاز خود را از پنل های متشکل از سلول های خورشیدی دریافت می کردند. سیستم های فتوولتائیک می تواند یکی از مهمترین روش هائی باشد که برق مورد نیاز روستاها و مناطق دور افتاده را تأمین نماید، زیرا بدلیل صعب العبور بودن اغلب این مناطق، تغذیه آنها از طریق شبکه های سراسری برق، بسیار پرهزینه و گاه غیر ممکن می باشد.

اگر چه تغذیه توسط سیستم های فتوولتائیک هنوز هم نسبت به تکنولوژی متداول تولید برق گران تر می باشند ولی یکی از بهترین روش هایی خواهد بود که برای تولید برق از انرژی پایان ناپذیر خورشیدی بهره می گیرد. بر اساس آمارهای موجود، در طول ۵ سال گذشته سالانه ۱۷ درصد بر فروش محصولات سیستم های فتوولتائیک افزوده شده است [۳]. با پیشرفت تکنولوژی ساخت سیستم های فتوولتائیک، بطور مستمر از هزینه آنها کاسته شده و امید می رود در دهه آتی تولید برق از آنها با سیستم های متداول، قابل رقابت گردد.

۱-۲- معرفی پدیده فتوولتائیک^۱

پدیده ای که در اثر تابش نور خورشید بدون استفاده از مکانیزم های محرک الکتروسیته تولید کند (تبدیل مستقیم نور خورشید به الکتروسیته)، را فتوولتائیک می گویند و به هر سیستمی که از این پدیده استفاده کند، سیستم فتوولتائیک نامیده می شود. در این روش انرژی تشعشعات خورشید بدون هیچ واسطه ای و فقط به کمک سلول های فتوولتائیک به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. مبنای اصلی این پدیده بر مبنای اثر فتوالکتریک است که برای اولین بار توسط انیشتن مطرح شد و بیان می داشت، انرژی نور باعث می شود تا الکترونها از ماده جدا شوند و این اثر، اساس کار سلول های فتوولتائیک می باشد که در قسمتهای بعد به عنوان اصلی ترین قسمت یک سیستم فتوولتائیک با طرز کار آن آشنا خواهیم شد.

بطور کلی ماژول های فتوولتائیک از چندین سلول خورشیدی تشکیل می شوند و معمولاً دارای مساحت کمتر از یک متر مربع بوده و قادر به تأمین توانی حدود ۵۰ تا ۱۵۰ وات می باشند. راندمان سلول های خورشیدی عبارت است از نسبت انرژی تاییده شده به انرژی الکتریکی تولید شده که برحسب جنس سلول و طراحی آن متغیر بوده و حدود ۱۰ الی ۲۱ درصد می باشد. روش های افزایش راندمان سلول های خورشیدی را می توان در نکات زیر خلاصه نمود.

(۱) اتصالات الکتریکی سلول ها چنان طراحی شوند که حداکثر نور به سطح سلول برسد.

(۲) استفاده از مواد مختلف برای ایجاد ترازهای متفاوت بصورتی که مجموعه سلولی بوجود آمده قادر به جذب طیف های مختلف نور خورشید باشد. به مجموعه بدست آمده دستگاه اتصال چندگانه می گویند.

(۳) استفاده از موادی که جذب کننده مناسبی برای نور خورشید باشند، بدین ترتیب برخورد مؤثر فوتون صورت گرفته و امکان آزادسازی الکترون حداکثر می گردد.

برای افزایش راندمان سلول فتوولتائیک راه های مختلفی وجود دارد که با قیمت تمام شده سلول رابطه مستقیم دارد. برای مثال گالیم آرسناید دارای راندمان بالاتری نسبت به سیلیکون، برای سلول های سیلیکونی تک کریستاله است و جذب کننده خوبی نیز می باشد، اما قیمت تمام شده آن بسیار بالاتر از سلول های سیلیکونی است. به همین ترتیب اگرچه تک کریستاله سیلیکون دارای راندمان بالاتری، (حدود ۱۶ الی ۱۸ درصد)، نسبت به، ۷ الی ۱۲ درصد، راندمان بی شکل می باشد اما قیمت تمام شده سیلیکون بی شکل بسیار ارزان تر است.

¹ photovoltaic

۱-۳-۱ اجزا سیستم های فتوولتائیک

اجزای اصلی سیستم فتوولتائیک عبارتند از: سلول‌ها، ماژول‌ها، آرایه‌ها، رگولاتور ولتاژ و کنترل کننده‌ها و باتری ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی.

۱-۳-۱-۱ سلول‌های خورشیدی

یک سلول خورشیدی^۱ از یک نیمه هادی با اتصال الکتریکی تشکیل شده و انرژی پرتوهای خورشید را جذب کرده و مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. جذب پرتوهای نوری موجب آزادسازی باندهای کووالانت که نماینده بهم پیوستگی شیمیائی آنها در نیمه هادی‌ها می‌باشد، می‌گردد. در این فرآیند یونیزه شدن هر دو نوع بارهای متحرک در یک شبکه نیمه هادی با (الکترون‌های منفی آزاد و حفره‌های مثبت آزاد) تولید می‌شوند. در نتیجه بارهای منفی به یک طرف و بارهای مثبت به طرف دیگر روانه می‌گردند. در اثر جدا شدن بارها، پتانسیل الکتریکی V در بین دو طرف قطعه نیمه هادی ایجاد می‌شود. با گذاشتن الکترودهائی در دو طرف نیمه هادی، جریان الکتریکی I را می‌توان توسط یک بار خارجی از آن دریافت نمود. قدرت الکتریکی $P=I \times V$ که از این طریق بدست می‌آید، به بار داده می‌شود.

یک سلول فتوولتائیک همزمان دو کار را انجام می‌دهد، دریافت انرژی خورشید و تبدیل آن به بار الکتریکی در دو سر خروجی آن و نیز جریان دادن بار الکتریکی به بیرون از محل تجمع که باعث تولید جریان الکتریکی می‌شود. انرژی دریافت شده بر حسب وات از خورشید به فرکانس امواج بستگی دارد بدین صورت که:

$$W = h \times f \quad (3-1)$$

که f فرکانس به هرتز و h ثابت پلانک (6.626×10^{-34}) است. فرکانس تشعشعات به طول موج آن بستگی دارد و با فرض در نظر گرفتن سرعت نور (C) برابر 3×10^8 m/s است.

سلول‌های خورشیدی را باید از فتوسل‌ها که با استفاده از خواص رسانائی نوری مواد، میزان شدت نور را اندازه‌گیری می‌کنند، متمایز نمود. فتوسل‌ها نسبت به نور بسیار حساس بوده و رسانائی آنها در نتیجه تغییر بسیار جزئی شدت نور، چندین برابر تغییر می‌کند. فتوسل‌ها در دوربین‌های عکاسی برای اندازه‌گیری نور مورد استفاده قرار می‌گیرند. آنها ولتاژی ایجاد نمی‌کنند و به همین دلیل بهره‌برداری از آنها تنها با وجود باتری ممکن است.

¹ Solar cell

اولین و کوچکترین واحد مستقل تمامی سیستم‌های فتوولتائیک، سلول خورشیدی می‌باشد. اندازه آن می‌تواند با توجه به کاربرد مورد نظر به نحو مطلوب انتخاب می‌گردد. اندازه سلول از چندین میلیمتر مربع برای کاربردهای الکترونیکی مصرفی (از قبیل ماشین‌های محاسبه جیبی، ساعت مچی و ...) تا اندازه استاندارد فعلی 10×10 سانتی متر مربع تغییر می‌کند.

شکل سلول مربع مستطیل می‌باشد، ولی شکل‌های دیگری همچون دایره، نیم دایره و یا سایر اشکال که دارای هزینه ساخت کمتری را دربر داشته باشند، نیز تولید شده است. نکته مهم اینست که سلول‌های خورشیدی را می‌توان در شکل‌های فیزیکی متفاوت ساخته و تولید نمود ولی بخاطر اینکه بسیار نازک هستند، خاصیت شکنندگی پیدا کرده و در نتیجه از نظر اندازه دارای محدودیت می‌باشند. سلول‌های خورشیدی از زمره دستگاه‌های بسیار نازک می‌باشند. به طور مثال ضخامت سلول 0.3 میلی متر می‌باشد. در حال حاضر تحقیق و توسعه برای هرچه نازک تر ساختن سلول‌های خورشیدی به منظور به حداقل رساندن مصرف مواد نیمه هادی و در نتیجه هزینه ساخت آنها، در مراکز تحقیقاتی دنیا در جریان است.

یک سلول خورشیدی از یک لایه بسیار نازک (حدود چند میکرون) از سیلیکون نوع N و لایه ضخیم‌تری از سیلیکون نوع P تشکیل یافته است. اغلب سلول‌های خورشیدی از تک بلور سیلیکون ساخته می‌شوند. ولی از نیمه هادی‌های دیگر از جمله سیلیکون آمورف، سیلیکون چند بلوره، آرسنید گالیم، سولفید کادمیوم و ترکیبات دیگر که از سیلیکون تک بلور ارزان تر می‌باشد، نیز در ساخت سلول‌های خورشیدی استفاده می‌گردد. شایان ذکر است که هر قدر میزان خلوص سیلیکون در سلول بیشتر باشد، راندمان آن هم افزایش می‌یابد. یک سلول خورشیدی با اندازه 10 سانتی متر در 10 سانتی متر چنانچه مستقیماً در معرض تابش مستقیم خورشید قرار گیرد، قدرتی نزدیک به $1/5$ وات می‌تواند تولید نماید. اگرچه سلیکون عنصر فراوانی است و درصد زیادی از پوسته زمین را تشکیل می‌دهد، ولی سلول‌های سلیکونی قیمت بالایی دارند و این بخاطر فرآیند ساخت و خالص سازی سیلیکون می‌باشد.

به منظور طراحی سیستم‌های فتوولتائیک، آگاهی از مشخصات و رفتار سلول‌های خورشیدی مورد نیاز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. با افزایش شدت تابش پرتوهای خورشیدی، قدرت الکتریکی خروجی نیز افزایش می‌یابد. در محاسبات هندسی معمولاً میزان شدت تابش پرتوهای خورشیدی بر سطح کره زمین، 1 kw/m^2 و یا 100 mw/cm^2 که واحد مناسب‌تری در رابطه با سلول‌های کوچک خورشیدی می‌باشد، در نظر گرفته می‌شود. ضمناً با افزایش دما، قدرت خروجی از سلول کاهش پیدا می‌کند. این امر یکی از محدودیت‌های مهم سلول‌های خورشیدی بوده و باید در طراحی کاربردهای مختلف، مورد توجه مهندسين قرار گیرد. به منظور کاهش این محدودیت، معمولاً از روش‌های متداول مهندسی برای دفع گرمای تولیدی در سلول استفاده می‌گردد. برای بهره‌وری بیشتر از سلول‌های خورشیدی، از متمرکز کننده‌هایی که پرتوهای خورشیدی را بر روی سلول‌ها متمرکز

می‌سازند، استفاده می‌گردد. در این موارد دمای سلول‌ها نیز افزایش محسوسی یافته که اثر معکوس بر قدرت الکتریکی خروجی خواهد داشت، لذا لازم است تا از تکنیک‌های دفع گرما استفاده گردد.

یکی از معیارهای مهم توسعه و ساخت یک سلول خورشیدی به حداکثر رساندن راندمان تبدیل نور خورشید به الکتریسیته می‌باشد. در سلول‌های خورشیدی مکانیزم‌های مختلف افت انرژی وجود دارد که بعضی از آنها غیر قابل اجتناب بوده و ذاتاً در سلول وجود دارند ولی برخی دیگر قابل کنترل می‌باشند و می‌توان آنها را به حداقل رسانید و یا به کلی حذف کرد. با توجه به این امر راندمان ایده‌آل یک سلول در حدود ۳۰ درصد می‌باشد. راندمان سلول‌های خورشیدی تجاری تحت تابش مستقیم خورشید، در حدود ۱۲ الی ۱۴ درصد می‌باشد، ولی در سطح آزمایشگاهی به راندمان‌های بالاتری نیز دست یافته‌اند. مثلاً راندمان سلول‌های خورشیدی منفرد از نوع کریستال‌های سیلیکون به ۲۳ درصد و راندمان سلول‌هایی که پرتوهای خورشیدی بر روی آنها متمرکز می‌شوند تا ۳۲ درصد گزارش شده است [۳].

به منظور کاهش هزینه ساخت سلول‌های خورشیدی که در سطوح مسطح قرار می‌گیرند، یک روش، توسعه و تعبیه سیستم‌های موثر متمرکز کننده می‌باشد. متمرکز سازی پرتوهای خورشیدی، دانسته قدرت نور خورشید بر روی سلول‌ها را افزایش داده و بنابراین سطح مورد نیاز سلول‌های خورشیدی را برای تولید قدرت خروجی کاهش می‌دهد.

سیستم‌های متمرکز کننده باید خورشید را ردیابی کرده تا پرتوهای آن‌را بر روی یک خط (در مورد ردیاب‌های یک محوره) و یا بر روی یک نقطه (در مورد ردیاب‌های دو محوره) متمرکز سازند. از آنجائیکه سیستم‌های متمرکز کننده ردیاب آفتاب تنها در مورد تابش مستقیم آفتاب کارائی دارند، بنابراین این سیستم‌ها برای شرایط آب و هوای مناطقی که دارای ساعات طولانی تابش مستقیم نور خورشید می‌باشند، مناسب هستند.

میزان متمرکز کنندگی پرتوهای خورشیدی به واحد "خورشید"^۱ سنجیده می‌شود. هر "خورشید" معادل شدت تابش 100 mw/cm^2 بوده و بنابراین ۱۰ خورشید برابر با شدت تابش 1000 mw/cm^2 می‌باشد.

سلول‌های خورشیدی متمرکز شده، معمولاً با توجه به کاربردهای مشخص از قبیل میزان متمرکز کنندگی، دمای بهره‌برداری پیش‌بینی شده، سیستم متمرکز کنندگی خطی و یا نقطه‌ای و یکنواختی نورهای متمرکز شده، طراحی می‌گردند. در این رابطه از متمرکز کننده‌های مختلف از قبیل آینه‌های سهموی، بشقاب‌های سهموی و غیره با توجه به میزان متمرکز سازی مورد نیاز استفاده می‌گردد.

¹ sun