بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

مدل‌سازی و کنترل واسطه‌های الکترونیکی برای نیروگاه‌های فتوولتایی با قابلیت تبادل توان راکتیو

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

مهرناز مددی

استاد راهنما

دکتر احمدرضا تابش

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق – قدرت خانم مهرناز مددی

تحت عنوان

مدل‌سازی و کنترل واسطه‌های الکترونیکی برای نیروگاه‌های فتوولتایی با قابلیت تبادل توان راکتیو

در تاریخ ۹۲/۱۱/۲ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر احمدرضا تابش
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر حمیدرضا کارشناس
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر سید محمدعلی خسروی‌فرد

از استاد عزیزم جناب آقای دکتر تابش که افتخار شاگردی ایشان را داشتم و در طی این دو سال در کمال سعه ی صدر و با مهری پدرانه، از هیچ کمکی دریغ نکردند، بی نهایت سپاسگزارم و امیدوارم که در همه ی مراحل زندگی همواره سربلند و موفق باشند. از استاد گرانقدر، جناب آقای دکتر کارشناس بابت مشاوره ی ایشان در طول این تحقیق کمال تشکر را دارم.

بوسه می زنم بر دستان پدر و مادرم که هیچ گاه دستانم را رها نکرده اند و گرمای وجودشان دلگرمی زندگی ام می باشد.

از همسرم، پناه خستگی هایم، که حضورش ناامیدی را از دلم می زداید و مایه ی آرامش خاطرم است، متشکرم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

دستان پر مهر پدرم

و قلب مهربان مادرم

به پاس عشق بی‌پایانشان

چکیده

آلودگی‌های زیست محیطی، پایان‌پذیر بودن سوخت‌های فسیلی و افزایش قیمت آن‌ها موجب شده است که استفاده از منابع تولید پراکنده با واسطه الکترونیکی به ویژه در سیستم‌های انرژی بادی و خورشیدی در سال‌های اخیر رشد چشم‌گیری داشته باشد. در این میان گرایش به انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع انرژی پاک و پایان‌ناپذیر با پیشرفت فناوری ساخت سلول‌های فتوولتایی و افزایش بازده آن‌ها به شدت افزایش یافته است به طوری که با کاهش شدید قیمت تولید سلول‌های خورشیدی در پنج سال گذشته، استفاده از نیروگاه‌های توان بالای خورشیدی فتوولتایی از جنبه اقتصادی توجیه‌پذیرتر شده است. در حال حاضر در اکثر کشورهای صنعتی طرح‌های نیروگاهی فتوولتایی در مقیاس بالاتر از صد مگاوات در حال ساخت و یا بهره‌برداری می باشد. در الگوریتم‌های کنترلی مدارهای واسطه‌های الکترونیکی سیستم‌های فتوولتایی، اولویت اصلی تزریق بیشینه توان اکتیو قابل دریافت از خورشید به شبکه می باشد. البته با توجه به امکان کنترل توان راکتیو به دلیل افزایش ظرفیت مبدل‌های الکترونیکی در نیروگاه‌های بزرگ و اهمیت کنترل توان راکتیو در بهبود حاشیه پایداری ولتاژ سیستم قدرت وکاهش تلفات، اخیرا بحث کنترل توان راکتیو توسط مبدل‌های نیروگاه‌های فتوولتایی نیز مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. یک نیروگاه فتوولتایی از مبدل‌های الکترونیکی متعددی تشکیل شده که توان خروجی آن‌ها در طول شبانه‌روز در بازه‌ی گسترده‌ای تغییر می‌کند و در شرایط ابری و یا شب‌هنگام توان اکتیو خروجی مبدل‌ها بسیار کم‌تر از ظرفیت نامی آن-هاست. با به‌کارگیری روش‌های کنترلی مناسب، می‌توان از این ظرفیت استفاده نشده برای تبادل توان راکتیو با شبکه استفاده نمود و یا حتی در شرایط اضطراری می توان میزان تبادل توان اکتیو نیروگاه را به منظور تزریق توان راکتیو کاهش داد.

در این پایان‌نامه یک مدل دینامیکی پیشنهادی برای کنترل سیستم‌های فتوولتایی ارائه شده است که در آن توان‌های اکتیو و راکتیو لحظه‌ای به طور مستقیم به عنوان متغیرهای دینامیکی سیستم کنترل در نظر گرفته شده‌اند. استفاده از توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای به عنوان متغیرهای دینامیکی به دلیل مستقل بودن شکل موج توان از قاب مرجع انتخابی موجب مقاوم‌تر شدن کنترل‌کننده‌ی طراحی شده نسبت به دینامیک-های مدل نشده سیستم می‌شود. همچنین نشان داده شده است که مدل پیشنهادی به دلیل استفاده از متغیر حالت توان به جای جریان موجب کاهش میزان غیرخطی بودن معادلات دینامیکی سیستم می شود. در ادامه دو روش کنترل با استفاده از مدل پیشنهادی که یکی بر مبنای روش بستن متوالی حلقه‌های کنترلی و دیگری با استفاده از روش خطی‌سازی با فیدبک است، برای کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو در یک نیروگاه خورشیدی مطرح شده است. دقت مدل و کارایی ساختار کنترلی پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی یک سیستم فتوولتایی ۱۲۰ کیلووات متصل به شبکه و هم‌چنین پیاده‌سازی عملی کنترل‌کننده‌ها بر روی یک سامانه تست آزمایشگاهی توان پایین مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و نتایج عملی ضمن تایید صحت مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی و راهبرد کنترل آن قابلیت کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو سیستم فتوولتایی با سرعت پاسخ مناسب در محدوده چند ده میلی ثانیه بدون خطای ماندگار و توانایی پس‌زنی اعوجاج را داراست.

واژه‌های کلیدی: ۱- مدل‌سازی دینامیکی ۲- کنترل سیستم فتوولتایی متصل به شبکه ۳- کنترل توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای ۴- کنترل چند متغیره سیستم فتوولتایی ۵- روش خطی‌سازی با فیدبک.

فصل اول

مقدمه

۱-۱- پیش‌زمینه و صورت مساله‌ی تحقیق

گرم شدن کره‌ی زمین، آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی همراه با پایان‌پذیر بودن و افزایش قیمت آن‌ها، علاقه‌ی روزافزونی برای استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر هم‌چون باد، خورشید، زیست توده[1] و امواج دریا به وجود آورده است. در این میان، گرایش به استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع انرژی پاک و پایدار که به اندازه‌ی کافی بر روی زمین موجود است، به علت دلایلی چون پیشرفت تکنولوژی ساخت سلول‌های فتوولتایی، افزایش بازده و کاهش قیمت آن‌ها، به شدت افزایش یافته است.

با وجود آن که تولید انرژی الکتریکی از طریق سلول‌های فوتوولتایی از دهه‌ی ۷۰ میلادی تا کنون وجود داشته است ولی کاربرد آن‌ها در قالب نیروگاهی به عنوان یک گزینه‌ی اقتصادی کارآمد، در چند سال اخیر اهمیت فراوانی یافته است. از مزیت‌های مهم سیستم‌های فتوولتایی: نصب، راه اندازی و قابلیت توسعه‌ی سریع و آسان تجهیزات مربوط به آن‌ها و هم‌چنین عدم نیاز به تعمیرات و نگهداری دوره‌ای به دلیل استاتیک بودن آن‌هاست که ورود به این زمینه از سیستم‌های فتوولتایی را برای بسیاری از سرمایه‌گذاران بخش‌های تحقیقاتی و صنعتی جذاب نموده است.

هزینه ی اولیه‌ی بالا برای نصب تجهیزات و راندمان پایین از مهم‌ترین مشکلات سیستم‌های فتوولتایی می‌باشند که برای غلبه بر آن‌ها، تحقیقات وسیعی در طول ده سال گذشته صورت گرفته است که نتیجه‌ی این تحقیقات، استفاده‌ی گسترده از روش های مختلف ردیابی نقطه‌ی بیشینه توان و ساختارهای جدید با بازده بالا برای مبدل‌های الکترونیکی موجود در سیستم‌های فتوولتایی، می‌باشد[۱]. با توجه به گرایش به استفاده از سیستم‌های فتوولتایی در توان‌های بالا و مقیاس نیروگاهی، یافتن راهکارهایی که به کاهش هزینه‌ها همراه با افزایش بازده و قابلیت اطمینان این نیروگاه‌ها بیانجامد، جذابیت فراوانی یافته است.

---

[1] Bio mass

در سیستم‌های فتوولتایی متصل به شبکه، مبدل الکترونیکی نقش مهمی به عنوان واسطه‌ی بین مجموعه‌ی آرایه‌های فتوولتایی و شبکه دارد که ساختارهای مختلفی از آن‌ها چون متمرکز، رشته‌ای، چندرشته ای و هم‌چین[۲] در سیستم‌های فتوولتایی وجود دارند. یک نیروگاه فتوولتایی با ساختار هم‌چین، از واسطه‌های الکترونیکی متعددی تشکیل شده است که توان خروجی آن‌ها در طول شبانه‌روز در بازه‌ی گسترده‌ای تغییر می‌کند. در این نیروگاه‌ها در اکثر مواقع توان اکتیو کم‌تر از ظرفیت نامی مبدل‌هاست، مخصوصا هنگام شب که توان اکتیو خروجی آن‌ها به صفر می‌رسد. با به‌کارگیری روش‌های کنترلی مناسب، می‌توان از این ظرفیت اضافی برای تبادل توان راکتیو با شبکه استفاده نمود[۲].

صرف نظر از نوع مبدل الکترونیکی استفاده شده در سیستم‌های فتوولتایی، کنترل‌کننده‌ی آن بایستی دو شرط را حتما برآورده سازد: ۱) کنترل توان اکتیو به دلیل جذب بیشینه توان اکتیو دریافتی از سلول‌های فتوولتایی که به تنظیم ولتاژ dc در مبدل الکترونیکی منبع ولتاژ[۳] یا جریان dc در مبدل الکترونیکی منبع جریان[۴] می‌انجامد و ۲) کنترل توان راکتیو تزریقی به شبکه به دلیل تاثیر آن بر پایداری سیستم در توان‌های بالا. مبدل الکترونیکی منبع ولتاژ به دلیل دارا بودن ویژگی مهمی چون قابلیت کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو، به صورت گسترده در کاربردهای اتصال به شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشکل اصلی در طراحی کنترل‌کننده برای مبدل الکترونیکی سیستم فتوولتایی از غیرخطی بودن مدل آن ناشی می‌شود که روش‌های کنترل خطی و غیرخطی متعددی در مراجعی نظیر [۴-۱]، [۴-۳] و [۴/۹] برای آن بیان شده است. محدودیت مشترک همه‌ی روش‌هایی که برای طراحی کنترل‌کننده در آن‌ها، ابتدا سیستم حول یک نقطه‌ی کار خطی می‌شود، این است که عملکرد کنترل‌کننده به همان نقطه‌ی کار وابسته است و در سایر نقاط امکان دارد که پاسخ مطلوبی نداشته باشد[۳]. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، روش‌های کنترل غیرخطی ارائه شده اند که پایداری و عملکرد مطلوب سیستم را در بازه‌ی وسیعی از ناحیه کار آن تضمین می‌کنند ولی ممکن است مقاوم نباشند

موضوع اصلی پژوهش این پایان‌نامه، افزایش مقاوم بودن سیستم کنترل مبدل‌ها با ارائه‌ی یک مدل پیشنهادی بر مبنای مولفه‌های توان لحظه‌ای است که درجه‌ی غیرخطی بودن معادلات دینامیکی سیستم را نیز کاهش می‌دهد. دلیل افزایش مقاوم بودن مدل پیشنهادی بر مبنای مولفه‌های توان لحظه‌ای، مستقل بودن شکل موج‌های توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای از قاب مرجع سنکرون است که باعث می‌شود سیستم در برابر دینامیک‌های مدل‌نشده‌ای چون دینامیک حلقه‌ی قفل فاز[۵] مقاوم‌تر باشد. دو روش طراحی کنترل‌کننده برای معادلات دینامیکی غیرخطی و چندمتغیره‌ی به دست آمده از روش پیشنهادی ارائه شده است که مبنای یکی خطی‌سازی معادلات دینامیکی سیستم غیرخطی چندمتغیره حول نقطه‌ی کار آن است و مبنای روش طراحی دوم، کنترل غیرخطی و روش خطی‌سازی بافیدبک[۶] است که استفاده از آن باعث می‌شود که با در نظر گرفتن غیرخطی بودن سیستم، بتوان کنترل‌کننده‌هایی کاملا مجزا برای کنترل میزان توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه پیاده‌سازی کرد. کنترل‌کننده‌های طراحی شده با

---

[2] Modular
[3] Voltage Source Inverter (VSI)
[4] Current Source Inverter (CSI)
[5] Phase Locked Loop (PLL)
[6] Feedback Linearization

این روش نه تنها محدوده‌ی کار سیستم را افزایش می‌دهند بلکه عملکرد آن‌ها از لحاظ سرعت ردیابی سیگنال‌های مرجع توان، پس‌زنی اعوجاج و مقاوم بودن آن‌ها در برابر تغییر پارامترها رضایت‌بخش است.

۱-۲- اهداف و انگیزه

هدف کلی این پایان نامه این است که با ارئه‌ی یک مدل دینامیکی جدید برای مبدل الکترونیکی سیستم فتوولتایی با در نظر گرفتن توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای به عنوان متغیرهای دینامیکی، بتوان با صرف هزینه‌ی کم و از طریق تغییر راهبرد کنترلی قابلیت تبادل توان راکتیو را به واسطه‌های الکترونیکی نیروگاه‌های فتوولتایی اضافه نمود. در این الگوریتم کنترلی علاوه بر امکان تزریق بیشینه توان اکتیو حاصل از خورشید، می‌توان از مزایای کنترل توان راکتیو از جمله بهبود کیفیت توان تزریقی به شبکه، کاهش تلفات سیستم و بهبود حاشیه پایداری سیستم بهره جست که به افزایش بازده کلی نیروگاه و در نتیجه کاهش زمان بازگشت سرمایه منجر می‌شود. در این راستا، اهداف مشخص این پایان‌نامه عبارتند از:

۱. بررسی مبدل‌های الکترونیکی مرسوم در نیروگاه‌های فتوولتایی و روش‌های کنترل آن‌ها؛
۲. ارائه‌ی یک مدل دینامیکی پیشنهادی برای مبدل الکترونیکی سیستم فتوولتایی متصل به شبکه بر مبنای توان‌های لحظه‌ای برای افزایش مقاوم بودن سیستم کنترل آن‌ها؛
۳. ارائه‌ی روشی برای طراحی سیستم کنترل با مدل پیشنهادی برای مبدل الکترونیکی بر مبنای روش خطی‌سازی با فیدبک؛
۴. ارزیابی کارایی و اعتبار مدل و روش پیشنهادی با تست بر روی یک نمونه‌ی آزمایشگاهی.

به منظور دست‌یابی به اهداف تعیین شده، در ابتدا ساختار سیستم‌های فتوولتایی و نقش مبدل الکترونیکی در این سیستم مطالعه شده است. مزایا و محدودیت‌های روش‌های کنترل مختلفی که برای کنترل این مبدل‌ها در یک سیستم فتوولتایی وجود دارد، بررسی شده و سپس با توجه به محدودیت‌های این روش‌ها، یک مدل دینامیکی غیرخطی چندمتغیره‌ی جدید با در نظر گرفتن توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای به عنوان متغیرهای دینامیکی ارائه شده و پس از خطی‌سازی معادلات حالت سیستم حول نقطه‌ی کار، برای آن کنترل‌کننده طراحی می‌شود. در ادامه با استفاده از روش خطی‌سازی با فیدبک برای مدل دینامیکی به دست آمده برای مبدل، کنترل‌کننده طراحی می‌شود. در پایان قابلیت کنترل‌کننده‌های طراحی شده با هر روش در دریافت بیشینه توان اکتیو از سیستم فتوولتایی، ردیابی سیگنال مرجع توان اکتیو وراکتیو تزریقی به شبکه، پس‌زنی اعوجاج و مقاوم بودن در برابر تغییر پارامترهای سیستم با استفاده از شبیه‌سازی سیستم ارزیابی شده و عملکرد آن‌ها با هم مقایسه می‌شود. در پایان اعتبار مدل و کنترل‌کننده‌های طراحی شده با روش پیشنهادی با استفاده از یک سامانه‌ی تست آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرارمی‌گیرد.

۱-۳- مرور پژوهش‌های انجام شده‌ی مرتبط

با کاهش شدید قیمت تولید سلول های خورشیدی در پنج سال گذشته، استفاده از نیروگاه‌های توان بالای فتوولتایی نیز دارای توجیه اقتصادی گردیده است به نحوی که در اکثر کشورهای صنعتی در حال حاضر طرح های نیروگاهی فتوولتایی در مقیاس بالاتر از صد مگاوات در حال بهره برداری می باشد. هم‌اکنون در آلمان ظرفیت سیستم‌های فتوولتایی نصب شده به ۱۷ گیگاوات رسیده است که نسبت به سال ۲۰۱۰ حدود ۷گیگاوات رشد داشته است. در ایتالیا نیز ظرفیت نصب سیستم‌های فتوولتایی در سال ۲۰۱۰ به بیش از ۲۹۰۰ مگاوات رسیده است که نسبت به سال ۲۰۰۹ دارای رشدی معادل ۱۴۰٪ می‌باشد[۴]. با توجه به رشد روزافزون سیستم‌های فتوولتایی و مشکلات مربوط به پایداری در شبکه‌ی قدرت، ایده‌ی استفاده از مبدل‌های الکترونیکی سیستم‌های فتوولتایی جهت تبادل توان راکتیو با شبکه علاوه بر تزریق توان اکتیو جذابیت فراوانی یافته است. ضرورت افزودن این قابلیت اضافی به واسطه-های الکترونیکی نیروگاه‌های فوتوولتایی در ژانویه ۲۰۰۹ توسط مرکز فدرال صنعت آب و انرژی آلمان برای این کشور به تصویب رسید. آمریکا در سال ۲۰۱۰ اقدام به نصب واسطه‌های الکترونیکی هوشمند در سیستم‌های فوتوولتایی بزرگ نموده است که با تزریق توان راکتیو قابلیت پشتیبانی از ولتاژ شبکه، متناظر با برنامه‌ی تدارک دیده را فراهم می‌سازد[۵].

در مرجع [۶]، مارتینسون[۷] مزایای استفاده از مبدل‌های الکترونیکی هوشمند سیستم‌های فتوولتایی جهت تبادل توان راکتیو با شبکه را مورد بررسی قرار داده است که نتایج تحقیقات او نشان می‌دهد با توجه به این‌که در بیش از ۹۵٪ ساعات شبانه‌روز، مبدل‌های الکترونیکی سیستم‌های فتوولتایی متصل به شبکه در جریانی کم‌تر از جریان نامی خود کار می‌کنند، استفاده ار ظرفیت اضافی آن‌ها برای تبادل توان راکتیو با شبکه و کاربرد آن‌ها به عنوان فیلترهای اکتیو و یا جبران‌کننده‌های توان راکتیو مخصوصا در شب و با صرف هزینه‌ی بسیار کم به افزایش بهره‌وری سیستم-های فتوولتایی می‌انجامد.

براون[۸] در مرجع [۷] ابتدا به بررسی دقیق ظرفیت اضافی مبدل‌های الکترونیکی سیستم فتوولتایی جهت تبادل توان راکتیو با شبکه در طول روز و شب به صورت جداگانه پرداخته و سپس هزینه‌ی لازم برای افزودن چنین قابلیتی به مبدل‌ها را مورد بررسی قرار داده است. نتایج این مطالعات حاکی از آن است که افزودن چنین قابلیتی به این مبدل-ها مخصوصا در آینده کاملا از توجیه اقتصادی برخوردار است و حتی در بعضی موارد استفاده از آن‌ها جهت جبران توان راکتیو شبکه در مقایسه با بانک‌های خازنی به صرفه‌تر است. مزیت مهم آن‌ها در مقایسه با بانک‌های خازنی، قابلیت آن‌ها در تزریق توان راکتیو به صورت پیوسته می‌باشد، در حالی که بانک‌های خازنی با تزریق توان راکتیو به شبکه به صورت گسسته باعث اعوجاج ولتاژ در حالت گذرا می‌شوند.

سولک[۹] و همکارانش در مرجع [۸] به ارزیابی گزینه‌های مختلف برای کنترل توان راکتیو مبدل‌های الکترونیکی سیستم فتوولتایی پرداخته‌اند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که برای دستیابی به شرایط بهینه در کنترل توان راکتیو این مبدل‌ها که همان کمینه کردن میزان تغییرات ولتاژ و تلفات سیستم است، بایستی مصالحه‌ای بین بهبود

---

[7] Martinson
[8] Braun
[9] Sulk

کیفیت و کاهش تلفات شبکه‌ی توزیع برقرار نمود. هم‌چنین عملکرد سیستم کنترل در صورتی که تزریق توان اکتیو و راکتیو سیستم‌های فتوولتایی به صورت پراکنده و موضعی در شبکه انجام شود، نسبت به حالتی که توان به صورت متمرکز و مرکزی تزریق شود، مطلوب‌تر خواهد بود.

در مرجع [۹]، کاگنانو و همکارانش اثر کنترل توان راکتیو تولیدی توسط مبدل‌های الکترونیکی سیستم فتوولتایی بر کاهش تلفات شبکه را مورد بررسی قرار داده‌اند. کنترل‌کننده‌ی تطبیقی طراحی شده در این مرجع براساس تئوری لیاپونوف[۱۰] می‌باشد و عملکرد آن به این صورت است که توان اکتیو تولیدی توسط سیستم فتوولتایی همواره به شبکه تزریق می‌شود ولی در صورتی که سیستم فتوولتایی نتواند توان اکتیو کافی تولید کند، مبدل‌های سیستم فتوولتایی جهت تزریق توان راکتیو فراخوانی می‌شوند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که با استفاده از این کنترل‌کننده می‌توان در هر لحظه خروجی سیستم فتوولتایی را در شرایط مختلف، به صورت بهینه کنترل کرد که این امر در کمینه کردن تلفات سیستم اثر چشم‌گیری دارد.

معمولا در سیستم‌های فتوولتایی متصل به شبکه از مبدل الکترونیکی منبع ولتاژ استفاده می‌شود که از دو روش کنترل ولتاژ یا کنترل جریان برای کنترل آن استفاده می‌شود[۱۰]. مسعود و همکارش در مرجع [۱۱] مقایسه‌ی دقیقی بین روش‌های کنترل جریان و کنترل ولتاژ ارائه داده‌اند که نتایج این بررسی نشان می‌دهد که بروز خطا در حلقه‌ی قفل شونده‌ی فاز[۱۱] اثر محسوس‌تری در وجود خطا در میزان توان تزریقی به شبکه هنگام استفاده از روش‌های کنترل ولتاژ در مقایسه با روش‌های کنترل جریان دارد. از آن‌جایی که تعیین دقیق میزان توان تزریقی به شبکه و حصول اطمینان از تزریق این میزان دقیق توان در کاربرد مبدل الکترونیکی جهت اتصال به شبکه و در شرایط کار معمول اهمیت فراوانی دارد، این مرجع اکیدا استفاده از روش‌های کنترل جریان را برای مبدل الکترونیکی متصل به شبکه برای تزریق توان پیشنهاد می‌دهد. در مرجع [current control] سِرپا[۱۲] مقایسه‌ی جامعی از انواع مختلف روش‌های کنترل جریان مبدل‌های چندسطحی متصل به شبکه هم‌چون سنجش شیب، هیسترزیس و کنترل مستقیم توان و کنترل برداری ارائه داده است که نتایج این مقایسه حاکی از آن است که هیچ‌کدام از روش‌های مطرح شده دارای هر چهار مزیت پایداری، هارمونیک و اعوجاج کم، پاسخ دینامیکی سریع و سادگی پیاده‌سازی نمی‌باشند.

غیرخطی بودن مدل دینامیکی مبدل الکترونیکی و هم‌چنین ولتاژ سلول فتوولتایی، مشکل اصلی در طراحی کنترل‌کننده برای سیستم فتوولتایی است که روش‌های کنترل خطی و غیرخطی فراوانی در مراجع مختلف برای آن بیان شده است[۱۲]. از میان روش‌های کنترل خطی مبدل الکترونیکی، روش‌های مبتنی بر فیدبک حالت با توجه به این‌که معمولا بر اساس سعی و خطا طراحی می‌شوند و به دلیل در نظر نگرفتن شروط کنترلی چون حاشیه پایداری سیستم در روند طراحی کنترل‌کننده، الزاما مقاوم نیستند[۱۳]. معمولا در روش‌های خطی، طراحی کنترل‌کننده براساس مدل سیگنال کوچک و از خطی فرض کردن سیستم حول نقطه‌ی کار آن در حالت پایدار انجام می‌شود که باتوجه به این‌که مدل خطی سیستم فقط حول همان نقطه‌ی کار صحیح است و بازه‌ی عملکرد آن محدود است، تضمینی بر پایداری و عملکرد مطلوب کنترل‌کننده در سایر نقاط کار وجود ندارد. برای غلبه بر این محدودیت‌ها،

---

10 Lyapunov theory
11 Phase Locked Loop(PLL)
12 Serpa

روش‌های مختلف کنترل غیرخطی جهت اطمینان از عملکرد مطلوب و پایداری کنترل‌کننده در یک ناحیه‌ی کار وسیع‌تر ارائه شده‌اند[۱۴]. روش خطی‌سازی با فیدبک[13] از روش‌های مهم در کنترل سیستم‌های غیرخطی است که با استفاده از آن می‌توان برای یک سیستم غیرخطی چندمتغیره، کنترل‌کننده‌های خطی مجزا طراحی کرد به طوری که عملکرد آن‌ها در ناحیه‌ی کار وسیع‌تری رضایت‌بخش باشد.

لی[14] و همکارانش در مرجع [۱۵] از روش خطی‌سازی با فیدبک برای کنترل مبدل‌های الکترونیکی سه‌فاز استفاده کرده اند و نتیجه‌ی کار آن‌ها حاکی از آن است که ظرفیت خازن الکترولیتی سمت dc به دلیل پاسخ سریع ولتاژ کاهش می‌یابد. نتایج کار لی و همکارانش در کاربرد این روش در یک پایلوت آزمایشگاهی برای کنترل مبدل الکترونیکی یک سیستم انرژی بادی [۱۶] و مبدل‌های الکترونیکی منبع تغذیه بدون وقفه[15] [۱۷] نشان از پاسخ دینامیکی سریع‌تر و عملکرد مطلوب کنترل‌کننده‌ها دارد.

زو[16] و همکارانش [۳] روش خطی‌سازی با فیدبک را برای کنترل مبدل‌های الکترونیکی در یک سیستم فتوولتایی با استفاده از مولفه‌های جریان متعامد در قاب مرجع سنکرون به کار برده‌اند و نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از این روش می‌توان بیشینه توان دریافتی از سیستم فتوولتایی را به شبکه تزریق کرد. اشکال روش استفاده شده در این مرجع این است که با ایده آل فرض کردن سیستم، از تلفات آن صرف نظر شده است.

در مرجع [۱۴] باو[17] و همکارانش به ارائه‌ی روش خطی‌سازی با فیدبک برای مبدل الکترونیکی یک سیستم فتوولتایی با فیلتر LCL پرداخته‌اند که نتایج تست عملی بر روی یک پایلوت آزمایشگاهی ۱۵۰ کیلووات نشان می‌دهد که عملکرد کنترل‌کننده‌ی طراحی شده مخصوصا در مجزا کردن سیستم چندمتغیره‌ی فتوولتایی و بهبود پاسخ دینامیکی آن رضایت بخش است. با توجه به این‌که متغیرهای دینامیکی استفاده شده در این روش، بر مبنای مولفه-های جریان متعامد بوده و دو حلقه‌ی کنترلی مجزا برای جریان در قاب مرجع سنکرون وجود دارد که نیاز به ماتریس‌های انتقال جریان از یک قاب مرجع به قاب مرجع دیگر می‌باشد، کنترل‌کننده‌ی طراحی شده نسبتا پیچیده می‌باشد.

۱-٤- ساختار پایان‌نامه

فصل دوم به معرفی ساختار سلول‌های فتوولتایی شامل نسل‌های مختلف این سلول‌ها، نحوه‌ی عملکرد و مدل آن‌ها و مشخصه‌های جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ می‌پردازد و هم‌چنین اجزای یک سیستم فتوولتایی و الگوریتم‌های مختلفی که برای دریافت بیشینه توان از سلول‌های فتوولتایی وجود دارد، معرفی می‌شود. در بخش‌های پایانی این فصل انواع ساختارهای مبدل‌های الکترونیکی موجود در یک نیروگاه فتوولتایی بیان شده و استانداردهای موجود برای اتصال یک سیستم فتوولتایی به شبکه نیز در انتهای فصل آورده شده است.

---

13 Feedback Linearization
14 Lee
15 Uninterruptible Power Supply (UPS)
16 Zue
17 Bau

در فصل سوم ابتدا مدل دینامیکی مبدل الکترونیکی بر مبنای مولفه‌های جریان متعامد در قاب مرجع سنکرون معرفی و مزایا و محدودیت‌های آن بررسی می‌شود. سپس مدل دینامیکی مبدل الکترونیکی سیستم فتوولتایی براساس یک مدل پیشنهادی که در آن توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای به عنوان متغیرهای دینامیکی در نظر گرفته شده‌اند، مطرح می‌شود و پس از خطی کردن معادلات دینامیکی سیستم حول نقطه‌ی کار، به طراحی کنترل‌کننده برای معادلات دینامیکی غیرخطی چندمتغیره‌ی به دست آمده، پرداخته می‌شود. در انتهای فصل، درستی عملکرد کنترل‌کننده‌ها در ردیابی سیگنال مرجع، پس‌زنی اعوجاج و مقاوم بودن در برابر تغییر پارامترها با استفاده از شبیه‌سازی یک سیستم فتوولتایی ۱۲۰ کیلووات متصل به شبکه ارزیابی شده است.

در فصل چهارم ابتدا روش خطی‌سازی با فیدبک بیان شده است و سپس مدل پیشنهادی با استفاده از این روش خطی شده و به طراحی دو حلقه‌ی کنترلی مجزا برای خروجی‌های سیستم پرداخته شده است. در پایان فصل عملکرد کنترل‌کننده‌های طراحی شده با استفاده از روش خطی‌سازی با فیدبک از طریق شبیه‌سازی یک سیستم فتوولتایی ۱۲۰ کیلووات بررسی شده است و نتایج آن با نتایج حاصل از عملکرد کنترل‌کننده‌های طراحی شده در فصل سوم از لحاظ سرعت ردیابی سیگنال مرجع، قابلیت پس‌زنی اعوجاج و مقاوم بودن در برابر تغییر پارامترها مقایسه شده است.

در فصل پنجم ابتدا با استفاده از روند مطرح شده در فصل سوم به طراحی یک کنترل‌کننده‌ی دیجیتال برای یک سلول فتوولتایی ۲۰۰ وات پرداخته شده است و سپس عملکرد کنترل‌کننده‌ی طراحی شده با استفاده از پایلوت آزمایشگاهی یک مبدل الکترونیکی با قابلیت تبادل بیشینه توان ۳ کیلووات، ارزیابی شده است که نتایج به دست آمده با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده است.

در فصل آخر پایان‌نامه خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام شده در این پایان‌نامه به همراه نتایج حاصل از این مطالعات آورده شده است و پیشنهاداتی جهت ادامه‌ی کار در زمینه‌ی موضوع مورد مطالعه در این پایان‌نامه بیان شده است.

فصل دوم
بررسی ساختارهای نیروگاه‌های فتوولتایی

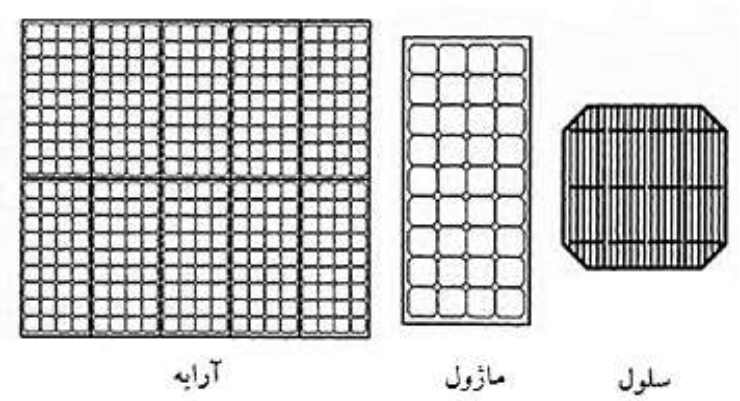
۲-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا ساختار سلول‌های فتوولتایی شامل نسل‌های مختلف آن‌ها، نحوه‌ی عملکرد، مدار معادل الکتریکی به همراه مشخصه‌های مهم سلول ارائه می‌شود و سپس اثر عواملی چون شدت تابش، دما و سایه بر توان خروجی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه اجزای یک سیستم فتوولتایی معرفی شده و سپس اهمیت روش‌های ردیابی نقطه‌ی کار با بیشینه توان و نحوه‌ی پیاده‌سازی این روش‌ها به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه با توجه به نقش مهم مبدل الکترونیکی در سیستم‌های فتوولتایی، انواع مختلف طبقه‌بندی مبدل‌های الکترونیکی سیستم-های فتوولتایی ارائه شده و روش‌های مختلف کنترل جریان آن‌ها به تفصیل شرح داده می‌شود و با یکدیگر مقایسه می‌شوند. سپس آماری از روند گسترش نیروگاه‌های فتوولتایی ارائه شده و انواع ساختارهای موجود برای مبدل‌های الکترونیکی در این نیروگاه‌ها شامل ساختار متمرکز، رشته‌ای، چندرشته‌ای و ماژول‌های ac مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در بخش انتهایی این فصل، استانداردهای لازم برای اتصال سیستم‌های فتوولتایی به شبکه بیان می‌شود.

۲-۲- ساختار سلول‌های فتوولتایی

۲-۲-۱- انواع نسل‌های سلول‌های فتوولتایی

پدیده فتوولتایی، ایجاد جریان الکتریکی در یک ماده نیمه‌رسانا در اثر انرژی فوتون‌های نور می‌باشد. در



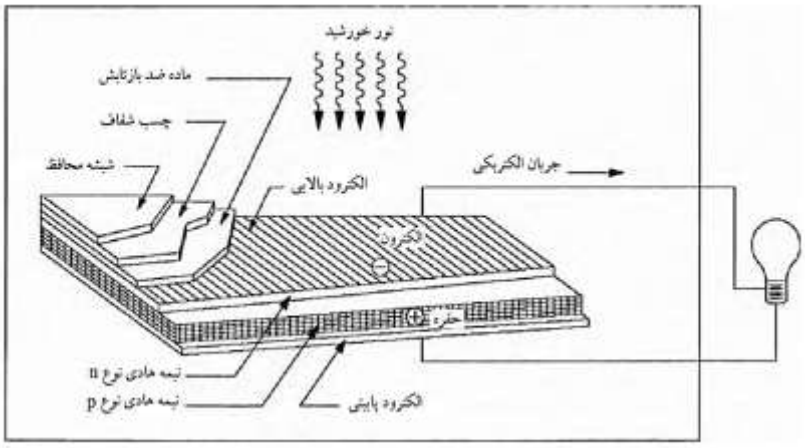
شکل ۲-۱- نمایش سلول، ماژول و آرایه‌های فتوولتایی [۳]

فناوری فتوولتایی از سلول‌های نیمه‌هادی برای تولید توان استفاده می‌شود و سلول خورشیدی جزء اصلی سازنده‌ی سیستم‌های فتوولتایی می‌باشد. معمولا اندازه‌ی یک سلول خورشیدی در حد چند سانتیمترمربع می‌باشد و در شرایط نور و شدت تابش استاندارد، جریانی برابر ۳۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع ایجاد می‌کنند که توان خروجی آن‌ها در این حالت ۳ وات است و معمولا به صورت سری- موازی به هم وصل می‌شوند تا توان بالاتری را فراهم سازند[۶]. همان-طور که در شکل ۲-۱ مشاهده می‌شود، از اتصال سلول‌ها یک ماژول فتوولتایی با توانی حدود چند صد وات ساخته می‌شود و اتصال چندین ماژول، یک آرایه‌ی فتوولتایی را می‌سازد که معمولا دارای توانی در محدوده‌ی چند کیلووات می‌باشند[۶]. با توجه به این‌که در ساخت اکثر سلول‌های فتوولتایی فعلی از مواد نیمه‌هادی به صورت کریستال استفاده می‌شود که هزینه‌ی تولید بالایی دارند، اهداف اصلی تحقیقات در زمینه‌ی سلول‌های فتوولتایی، بهبود بازده تبدیل انرژی و کاهش هزینه‌های مربوط به فرآیند ساخت آن‌ها می‌باشد که تلاش برای رسیدن به این اهداف، منجر به بروز انواع مختلفی از سلول‌های فتوولتایی در بازار شده است که در ادامه نسل‌های مختلف فناوری ساخت سلول‌های فتوولتایی معرفی می‌شود.

نسل اول (با مبنای کریستال سیلیکن): فناوری نسل اول قدیمی‌ترین نوع سلول فتوولتایی است که بر پایه ویفرهای سیلیکنی با ضخامت ۳۰۰ میکرومتر الی ۴۰۰ میکرومتر است و بالاترین بازده، در حدود ۱۲٪ الی ۱۵٪ ، را دربین سایر انواع سلول‌ها دارد. این سلول‌ها ساختاری بلوری[1] یا چند بلوری[2] دارندکه با توجه به این‌که فناوری ساخت آن‌ها کاملا صنعتی شده و قیمت پایینی دارند، حدود ۸۵٪ سلول‌های تولید شده در دنیا از این نوع می-باشند[۳].

نسل دوم (با مبنای کریستال سیلیکن و فناوری لایه نازک): فناوری لایه نازک(نسل دوم)، براساس لایه نشانی نیمه هادی[3] روی بسترهای شیشه‌ای، فلزی یا پلیمری و در ضخامت‌های ۳ میکرومتر الی ۵ میکرومتر است. تفاوت آن-ها با نسل اول در این است که به صورت کریستال منظم نمی‌باشند و اندازه آن‌ها تا ۱۰۰ برابر بزرگتر از اندازه سلول ساخته شده با فناوری نسل اول است و هزینه‌ی مواد اولیه در آن‌ها پایین‌تر است که مزیتی برای تولید انبوه محسوب

[1] Monocrystalline
[2] Polycrystalline
[3] Thin film deposition



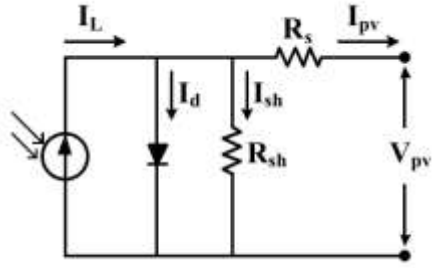
شکل ۲-۲- نحوه عملکرد سلول فتوولتایی [۲]

می‌شود.هرچند این نسل از سلول فتوولتایی، بازده نسبتا پایینی در حدود ۸٪الی ۱۰٪ دارند ولی در برابر دما نسبت به نسل اول مقاوم‌تر هستند[۷].

نسل سوم (با مبنای مواد آلی): در فناوری ساخت این نسل از سلول‌های فتوولتایی از پلیمرها و موادآلی(ارگانیک) استفاده می‌شود. هر چند این نسل از سلول‌های فتوولتایی، فعلا دارای بازده بسیار کمی (حدود ۴٪) می‌باشند و طول عمر کم‌تری، حدود سه تا پنج سال در مقایسه با ۲۵ سال عمر سلول‌های سیلیکنی دارند ولی به دلایلی چون هزینه ساخت پایین و قابلیت انعطاف پذیری، برای مصارف غیرصنعتی مناسب هستند. از نسل سوم سلول-های فتوولتایی می‌توان به سلول های خورشیدی حساس به رنگ و سلول های خورشیدی پلیمری اشاره کرد که در حال حاضر فقط در سطح تحقیقات دانشگاهی و مراکز تحقیقاتی دنیا وجود دارد[۲].

۲-۲-۲- نحوه عملکرد یک سلول فتوولتایی

عملکرد یک سلول فتوولتایی بسیار شبیه به یک دیود معمولی با پیوند pn می‌باشد. اتصال pn از کنار هم قرار دادن یک لایه زیرین نیمه‌هادی نوع p و یک لایه بالایی نیمه‌هادی نوع n ایجاد می‌شود. در ناحیه اتصال این دو نوع نیمه‌هادی، بازترکیب ناخالصی‌های نوع p و n، موجب ایجاد ناحیه تهی و به وجود آمدن میدان الکتریکی در محل پیوند pn می‌شود. زمانی که نور به سطح یک سلول فتوولتایی برخورد می‌کند، قسمتی از آن توسط نیمه‌هادی جذب می‌شود و الکترون‌های آزاد شده در اثر انرژی این فوتون‌های جذب شده، در میدان الکتریکی پیوند pn، شتاب گرفته و باعث ایجاد جریان الکتریکی می‌شوندکه با قرار دادن دو الکترود در بالا و پایین سلول و تشکیل یک مدار مانند شکل ۲-۲ می‌توان این جریان رابه بار الکتریکی متصل به سلول منتقل کرد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود الکترود پایینی به صورت یکپارچه است ولی الکترود بالایی باید به صورت سیم‌های بسیار نازک و مشبک باشد تا نور بتواند عبور کرده و به سطح سلول برخورد کند و جذب آن شود. بر روی سطح سلول یک ماده ضد بازتابش قرار داده می شود تا از انعکاس نور خورشید جلوگیری شود و برای محافظت از سطح سلول، یک لایه‌ی



شکل ۲-۳- مدار معادل الکتریکی سلول فتوولتایی

محافظ پلاستیکی یا شیشه‌ای با استفاده از چسب بر روی سطح سلول قرار داده می‌شود.

۲-۲-۳- مدار معادل الکتریکی یک سلول فتوولتایی

یک سلول فتوولتایی را می‌توان با یک مدارمعادل الکتریکی مانند شکل ۲-۳ نشان داد که شامل منبع جریان I_L برای نشان دادن جریان ایجاد شده در اثر تابش نور خورشید و یک دیود موازی با آن برای مدل کردن پیوند pn می‌باشد. اثر خواص انتشار الکترون و حفره در نیمه‌هادی، مقاومت نیمه‌هادی و مقاومت اتصالات داخلی (سیم‌های الکترود) را با یک مقاومت کوچک(R_s) در حد چند دهم اهم، به صورت سری با دیود و منبع جریان نشان داده شده است. اثر ایده‌آل نبودن پیوند pn و ناخالصی‌های اطراف ناحیه اتصال pn را با یک مقاومت بزرگ(R_{sh}) در حد چند صد اهم، به صورت موازی با دیود و منبع جریان نشان داده شده است. حساسیت بازده تبدیل سلول فتوولتایی نسبت به تغییرات R_s بسیار زیاد است و حتی تغییرات بسیار کوچک آن نیز می‌تواند توان خروجی سلول را به شدت کاهش دهد ولی تغییرات R_{sh} اثری بر توان خروجی آن ندارد و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. در مدار معادل الکتریکی سلول فتوولتایی، جریان خروجی جاری شده در بار متصل به سلول، به صورت زیر است:

$$I_{pv}=I_L-I_d-I_{sh} \qquad (۱-۲)$$

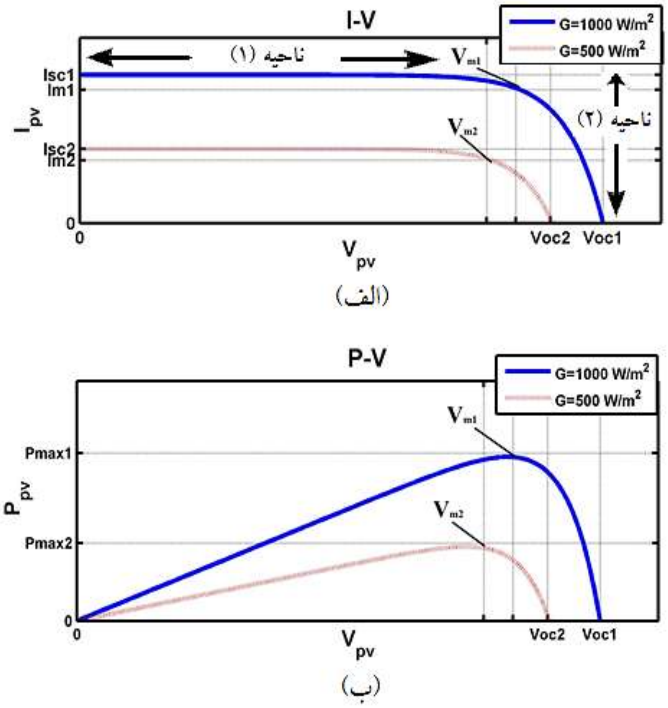
I_{sh} معادل جریان نشتی به زمین می‌باشد که در عمل در مقایسه با I_L و I_d از آن صرف‌نظر می‌شود. زمانی که سلول اتصال کوتاه شود، جریان اتصال کوتاه آن تقریبا با جریان I_L برابر است. عوامل موثر بر جریان I_L، شدت تابش خورشید و دما هستند که رابطه‌ی آن در زیر آمده است[۸]:

$$I_L=I_{sc}=I_{sc_{ref}}\frac{G}{G_{ref}}\left[1+\alpha\left(T-T_{ref}\right)\right] \qquad (۲-۲)$$

که در رابطه (۲-۲)، G_{ref} شدت تابش خورشید برابر$۱۰۰۰\mathrm{W/m^2}$ ، T_{ref} دمای استاندارد معادل ۲۵ °C، $I_{sc_{ref}}$ جریان اتصال کوتاه سلول در شرایط استاندارد و α ضریب ثابت دما برای جریان است. جریان دیود از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید و دلیل اصلی غیرخطی بودن مشخصه I-V سلول فتوولتایی می‌باشد:

$$I_d=I_0\left(exp\left(\frac{V_{pv}+I_{pv}R_s}{nkT/q}\right)-1\right) \qquad (۳-۲)$$

که در رابطه (۲-۳)، I_0 جریان اشباع معکوس دیود، T درجه حرارت سلول، k ثابت بولتزمن، q بار الکترون



شکل ۲-۴- مشخصه الف) I-V و ب) P-V سلول به ازای شدت تابش‌های مختلف در دمای ۲۵ °C

و n شاخص میزان ایده‌آل بودن دیود است که برای سلول‌های فتوولتایی سیلیکنی معادل ۱/۳ می‌باشد. با جای‌گذاری رابطه (۲-۲) در رابطه (۲-۱)، جریان سلول فتوولتایی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$I_{pv}=I_L-I_0\left(exp\left(\frac{V_{pv}+I_{pv}R_s}{nkT/q}\right)-1\right)-\frac{V_{pv}+I_{pv}R_s}{R_{sh}} \qquad (۴-۲)$$

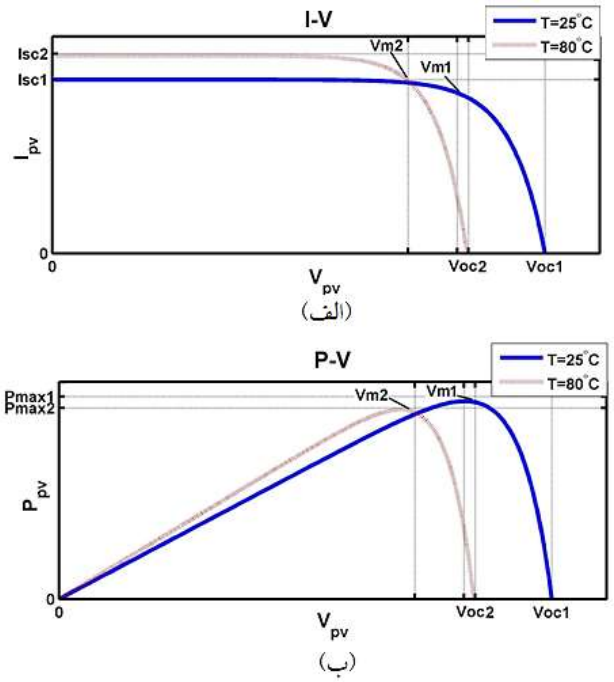
ولتاژ مدار باز سلول با صفر قرار دادن جریان سلول و صرف نظر از جریان نشتی به زمین، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$V_{oc}=\frac{nkT}{q}ln\left(\frac{I_L}{I_0}+1\right) \qquad (۵-۲)$$

در شکل ۲-۴-الف مشخصه I-V یک سلول فتوولتایی نشان داده شده است که ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه سلول بر روی شکل مشاهده می‌شود و نقطه‌ی زانویی منحنی، معادل نقطه‌ی بیشینه توان سلول است. توان یک سلول فتوولتایی حاصل‌ضرب ولتاژ در جریان آن می‌باشد که در شکل ۲-۴-ب مشخصه P-V یک سلول فتوولتایی نشان داده شده است، در قله‌ی منحنی، توان خروجی سلول بیشترین مقدار خود را دارد که ولتاژ سلول در نقطه‌ی بیشینه توان از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$V_{mp}=V_{oc}-\frac{nkT}{q}ln\left(\frac{V_{mp}}{(nkT/q)}+1\right) \qquad (۶-۲)$$

با دقت در رابطه‌ی (۲-۲) مشاهده می‌شود که جریان اتصال کوتاه سلول فتوولتایی به صورت مستقیم به شدت تابش (G) وابسته است، در حالی که از رابطه‌ی (۲-۵) کاملا مشخص است که ولتاژ مدار باز سلول به صورت



شکل ۲-۵- مشخصه الف) I-V و ب) P-V سلول به ازای دماهای مختلف در شدت تابش $1000\ w/m^2$

لگاریتمی به I_L و در نتیجه به شدت تابش وابسته است و به همین دلیل تغییر شدت تابش بر تغییر جریان اتصال کوتاه سلول اثر بیش‌تری دارد و با کاهش شدت تابش، توان خروجی سلول نیز کاهش می‌یابد که این موضوع در شکل ۲-۴ نیز مشاهده می‌شود.

۲-۲-٤- عوامل موثر بر عملکرد یک سلول فتوولتایی

اثر دما: پارامتری که افزایش دمای سطح سلول، بیش‌ترین اثر را بر آن دارد، ولتاژ مدار باز سلول است چون افزایش دمای سطح سلول باعث تغییر خواص نیمه‌هادی شده و I_0 افزایش می‌یابد و در نتیجه طبق رابطه‌ی (۲-۵) ولتاژ مدار باز سلول کاهش می‌یابد، در حالی‌که جریان اتصال کوتاه آن به میزان جزیی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال با افزایش دمای سطح سلول به اندازه $\Delta T=T_2-T_1$، جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز آن طبق رابطه‌ی زیر تغییر می‌کنند:

$$I_{sc} = I_l(1 + \alpha \Delta T) \quad (2\text{-}7)$$

$$V_{oc} = V_l(1 - \beta \Delta T) \quad (2\text{-}8)$$

که در روابط بالا، I_1 جریان اتصال کوتاه سلول در دمای اولیه T_1، V_1 ولتاژ مدار باز سلول در دمای اولیه T_1، α ضریب ثابت دمایی مربوط به جریان، β ضریب ثابت دمایی مربوط به ولتاژ است. با توجه به این‌که مقدار β نسبت به α بسیار بیش‌تر است، با افزایش دما به T_2، میزان افزایش جریان اتصال کوتاه در مقایسه با میزان کاهش ولتاژ مدار باز، بسیار کم‌تر است و در نتیجه توان خروجی سلول در دمای کار بالاتر، کاهش می‌یابد. در شکل ۲-۵، به ازای دماهای مختلف، مشخصه I-V و P-V سلول نشان داده شده است که در شکل ۲-۵-الف مشاهده می‌شود با افزایش