روشی جدید جهت کنترل سیستم فتوولتائیک و کنترل و تزریق توان راکتیو با هدف کنترل ولتاژ

مریم هاشمی نمین[۱]، سعید افشارنیا[۱] ، وحید صالحی‌پور[۱]

تاریخ دریافت مقاله:
۸۸/۲/۲۲
تاریخ پذیرش مقاله:
۸۸/۵/۲۴

چکیده:

در مقاله حاضر فوتوولتائیک به عنوان یکی ازجذاب ترین روش های تولید انرژی در میان انرژی های تجدید شونده مورد بررسی، مطالعه و تمرکز قرار گرفته است. این شیوه تولید توان به سبب طبیعت تمیز و بدون نیاز به سوخت آن روز به روز توجه بیشتری به خود جلب می نماید. تولید توان قابل قبول از دید استاندارد کیفیت توان محققین را وادار می نماید تا بر روی پارامترهای خروجی سیستم های فوتوولتائیک و کنترل آنها به طریق مطلوب تمرکز نمایند.

در بخش DC ماژول های فوتوولتائیک مدلسازی شده و همچنین مبدل DC/DC به طریق مخصوص کاربرد فوتوولتائیک شبیه سازی و طراحی شده است. مساله مهمی که در این بخش مطرح است و بطور مستقیم در بازده سیستم فوتوولتائیک دخالت دارد بحث ردیاب حداکثر توان می باشد (MPPT[۲]) . تکنیک ردیابی حداکثر توان به کار برده شده در این مقاله تکنیک نمو رسانایی می باشد. در بخش AC که تمرکز اصلی مقاله حاضر است روش جدیدی برای کنترل نقطه کوپل مشترک (PCC)[۳] پیشنهاد شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته که تثبیت ولتاژ را در این نقطه به دنبال دارد. براساس روش کنترلی پیشنهادی، باس محل نصب PV در شبکه قدرت به عنوان شین PŪ[۴] معرفی شده و در محاسبات پخش بار به کار می رود. در این راستا ایده دیگر مورد نظر تحقیق که همانا تولید توان راکتیو توسط سیستم فتوولتائیک می‌باشد در قالب ایده کنترل و تثبیت ولتاژ برای رسیدن به شین PŪ محقق می شود.

کلمات کلیدی:
نقطهٔ کوپل مشترک، پروفایل ولتاژ، کنترل PU، پروفایل بار مدل PQ، راکتیو

۱) دانشکده فنی دانشگاه تهران ـ برق منطقه‌ای تهران ـ انستیتو مهندسی برق و کامپیوتر، برق منطقه‌ای تهران

۲) Maximum Power Point Tracking

۳) Pont of Common Coupling

۴) Active Power-Voltage Control

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]

مقدمه

از اوایل قرن بیستم با افزایش آلودگی ناشی از گازهای گلخانه ای همزمان با روند کاهش منابع انرژی، توجه به استفاده از منابع انرژی های عاری از آلودگی برجسته شده است. علیرغم تکنولوژی پیچیده، فتوولتائیک به دلیل عدم نیاز به سوخت و طبیعت پاکیزه مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. در ۲۰ سال گذشته سالانه انرژی گرفته شده از خورشید رشد چشمگیری داشته است که ناشی از برخی پیشرفت‌ها در تکنولوژی تولید سلول‌های خورشیدی و تجهیزات مرتبط و تلاش در جهت کاهش هزینه ها بوده است.

در راستای افزایش بازده تبدیل انرژی و حفظ ولتاژ مناسب، توپولوژی های متعدد مبدلهای بوست مورد بررسی قرار گرفته اند [۱و۲]. در [۳] یک نمونه توپولوژی مبدل DC/DC با اختلاف سطح ولتاژ بالا و تثبیت کننده ولتاژ خروجی جهت استفاده در ورودی اینورتر DC/AC را معرفی می نماید. از سال ۲۰۰۳ کاربرد مستقل از شبکه سیستم های فتوولتائیک مورد مطالعه قرار گرفته، و عملکرد دینامیکی منابع تولید پراکنده تجدید پذیر مستقل از شبکه و در مواردی نمونه های توام بادی ـ خورشیدی با حضور باتری تحلیل شده اند. تا به حال نمونه کاربردهای بسیاری در حالت بهره برداری به صورت مستقل از شبکه به چشم می خورد که هدف اصلی در آنها متعادل سازی بارهای محلی می باشد[۴-۶]. سیستم های نصب مستقل فتوولتائیک نخست برای پاسخ به نیاز بارهای محلی در هنگام کمبود تولید شبکه در دوره های زمانی خاص طراحی شده بودند. این گونه سیستم های فتوولتائیک بر تامین بارهای خود متمرکز می‌شوند بنابراین چندان نگران کیفیت و انعطاف پذیری توان تولیدی تحویلی به مصرف کننده نیستند. از دید صنعت برق یک سیستم تجدید پذیر با توانایی تزریق توان با نوسان کم یا با توانایی تنظیم توان مطلوب تر است.

چنین به نظر می رسد که به کار بستن سیستم های فتوولتائیک متصل به شبکه به خاطر فراهم نمودن انرژی غیرفسیلی در دهه اخیر ارجحیت دارد. در مطالعه‌ای که در [۷] انجام شده سیستم PV متصل به شبکه با مرجع قرار دادن جریان خروجی در مد کنترلی جریان کنترل می شود. مدل کنترلی ارائه شده در مقاله مذکور تواماً فاکتورهای کنترلی خروجی ردیاب حداکثر توان یا MPPT را در الگوریتم کنترلی دخالت می‌دهد. درنتیجه بازده کل سیستم به دلیل وابستگی به پارامترهای MPPT و بخش DC پایین می باشد. مضاف بر اینکه هیچ تزریق توان راکتیوی نیز اتفاق نمی‌افتد. روند مشابهی در سال ۲۰۰۶ در [۸] انجام شده است، به این ترتیب که بخش DC و AC مجزا شده و با استفاده از یک اینورتر منبع جریان، مد کنترل جریان برای دستیابی به ضریب توان واحد و تزریق توان اکتیو اعمال شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]

ایده دیگری در سال ۲۰۰۷ در [۹] تزریق توان اکتیو و راکتیو را با حضور یک ترانسفورماتور مطرح نموده و برای تطابق توان تولیدی با توان مورد نیاز شبکه مد کنترلی جریان اعمال شده است که کاستی ها و معایبی را دارا می باشد. تا سال ۲۰۰۸ روشهای کنترلی متفاوتی برای سیستم های فتوولتائیک مطرح شده است[۱۱و۱۰]. بر اساس طراحی انجام شده، سیستم فتوولتائیک به عنوان یک منبع جریان به شبکه معرفی می شود. در این شرایط جریان تزریقی به ولتاژ نقطه کوپل مشترک یا PCC و به همین نسبت به شرایط بار شبکه وابسته است. همچنین، در [۱۲] پیشرفت های قابل توجهی در طراحی و اجرای اینورتر صورت گرفته است. در سال ۲۰۰۸ در [۱۳] از اینورتر با کنترل PWM برای تولید جریانی همفاز با ولتاژ شبکه استفاده شده است تا به ضریب توان واحد در PCC دست یابد. در [۱۴] ایده کنترل اینورتر بر مبنای کنترل جریان است. در حالیکه ولتاژ PCC بدون اعمال هیچ کنترلی باقی می ماند و هدف سیستم، تولید توان اکتیو می باشد. این شرایط چندان مقرون به صرفه نیست چراکه از ظرفیت تولید توان راکتیو سیستم استفاده نمی شود.

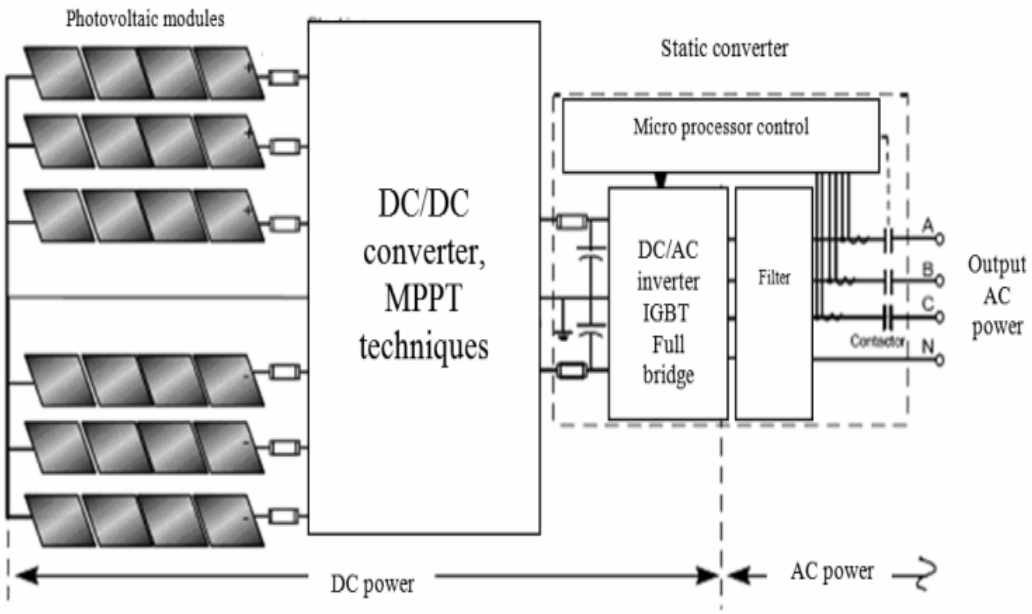
تا به حال مانند آنچه در [۱۵] آمده، اکثر شبکه های توزیع برای عملکرد در شرایط شعاعی تک فیدر طراحی شده اند. در این نوع شبکه در تمام نقاط توان از سمت پست به سمت بار جاری می شود. با نصب منابع تولید پراکنده اعم از سیستم‌های تولید توان فتوولتائیک، برنامه ریزان شبکه و مصرف کنندگان توانایی تزریق توان به شبکه را دارا می باشند مضاف بر اینکه موظفند پارامترهای الکتریکی را در نقطه کوپل مشترک کنترل نمایند. لذا بهینه سازی روشهای کنترلی ضرورت دارد. وقتی در شبکه منابع متعدد وجود داشته باشند احتمال جاری شدن توان برگشتی از منابع پراکنده به سمت پست وجود دارد. شارش توان معکوس در فیدر های شعاعی می تواند منجر به ایجاد اضافه ولتاژ در PCC در شرایط کم باری شود. سطح ولتاژ به وضعیت و ساختار شبکه تحت شرایط بار وابسته است. این به توان لحظه ای تولیدی PV نیز وابسته می باشد و شرکتهای توزیع برق می بایست برخی استاندارد های کیفیت توان را در این میان رعایت نماید.

در مروری که بر مطالعات انجام شده صورت گرفته سیستم های PV عمدتاً به عنوان یک منبع جریان در شبکه تعریف گردیده و تنها با هدف تولید توان اکتیو، کنترل می شوند. روش کنترلی پیشنهاد شده در این مقاله کنترل سیستم فتوولتائیک و اینورتر با هدف تثبیت ولتاژ می باشد. در راستای اعمال کنترل ولتاژ، از تجهیزات موجود در سیستم PV بهره گرفته و با در نظر گرفتن ظرفیت اضافه برای اینورتر علاوه بر توان اکتیو، توان راکتیو را نیز تولید می نماییم که در نهایت امکان تعریف شین فتوولتائیک به عنوان شین PŪ فراهم می گردد. در ادامه ابتدا کل سیستم معرفی شده و در بخشهای مختف مدل های انتخابی و روشهای کنترلی اعمال شده معرفی می گردد. سپس با پرداختن به بحث کنترل اینورتر و پیاده‌سازی ایده کنترلی جدید، نتایج مطلوبی ارائه می گردد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]

سیستم فتوولتاییک

سیستم فتوتوولتائیک از ماژول های فتوولتائیک، تجهیزات حفاظتی، مبدل DC/DC، اینورتر DC/AC ، فیلتر و سیستمهای کنترلی تشکیل می شود که در شکل (۱) به نمایش در آمده است.



شکل ۱: سیستم فتوولتائیک و اجزای اصلی آن

دو ساختار کنترلی وجود دارد: ردیاب نقطه حداکثر توان یا MPPT و کنترل اینورتر. ویژگی اصلی MPPT دستیابی به توان حداکثر از مولد فتوولتائیک است. هدف کنترل اینورتر اعمال کنترل توان راکتیو و ولتاژ در PCC، و تقویت کیفیت توان تزریقی به شبکه می‌باشد که بطور مفصل توضیح داده خواهد شد.

عملکرد آرایه های خورشیدی توسط دو منحنی I-V و P-V تعریف می شوند. نقطه زانویی در این مشخصه‌ها وجود دارد که دو ناحیه مجزا را تعریف می‌نماید که همان نقطه واقعی ماکزیمم توان بوده و تاکنون روشهای متعددی جهت ردیابی آن در خروجی ماژول‌های PV معرفی شده‌اند تا نقطه کار را در آن حوالی حفظ نمایند[۱۷]. روش‌های مذکور تحت عنوان ردیاب نقطه حداکثر توان یاMPPT نام‌گرفته‌اند. اعمال چنین تکنیکهایی به PV این امکان را می دهند که مستقل از نقطه کوپل مشترک و مستقل از سیستم، از جهت بار و ولتاژ عمل نموده و بازده کلی سیستم را ارتقا دهند[۱۸]. روش

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]

پیاده‌سازی شده در این مقاله روش نمو رسانایی یا Inc-Cond[1] می‌باشد که از یک سری جستجوی آنی بر میزان نمو جریان متناسب با ولتاژ تشکیل می‌شود. در این روش انحرافات از نقطه مرجع با تغییر مقادیر مرجع پارامترهای ورودی در ماژول‌های PV جبران می‌گردد. روشهای متعدد دیگر که در این راستا تاکنون مطرح شده‌اند که در [۱۹–۲۲] آمده‌اند. روش نمو رسانایی در مقایسه با روش PnO [۲] گذشته از ساده‌تر بودن مزایایی دارد که تشخیص و نگهداری نقطه ماکزیمم توان و همچنین حذف نوسانات حول نقطه تنظیم از آن جمله‌اند [۲۳–۲۵]. بر طبق مطالعات انجام شده در [۲۶] از روش نمو رسانایی انتظار می‌رود که در هنگام بروز تغییرات در شرایط محیطی پایدار بوده و در شرایط ماندگار تلفات کمتری داشته باشد[۲۷]. الگوریتم مربوط به روش نمو رسانایی و نتایج شبیه‌سازی در Simulink در مراجع [۲۸ و ۲۹] در دسترس می‌باشد. در جهت آزمایش عملکرد بخش DC سیستم فتوولتائیک، MPPT و کنترل PWM اینورتر در تحقیق حاضر مطالعاتی انجام شده است که در نسخه های پیشین مقالات نویسنده در دسترس می باشد [۲۸و ۲۹]. در مراجع اشاره شده موارد گوناگون تغییرات اعم از اتصال کوتاه، تغییر در تابش و خطا در ترمینال PV مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و بازتاب آنها در پروفیل ولتاژ، حساسیت شینه‌ها و پایداری با تمرکز بر میزان ظرفیت آزاد شده خطوط در یک نمونه شبکه استاندارد IEEE با ۱۳ شینه ارائه شده است [۳۰].

توپولوژی اینورتر متصل به شبکه

بهینه سازی کنترل اینورتر بر عملکرد اینورتر متصل به شبکه در مواردی چون : کاهش کل اغتشاشات هارمونیکی در باس خروجی، جلوگیری از تزریق جریان DC به بخش AC، موثر است. بهره‌برداری از سیستم های PV متصل به شبکه مستلزم تولید توان قابل قبول برای شبکه است که بر استانداردهای مرتبط با نحوه اتصال منطبق باشد [۳۲ و ۳۳]. با در نظر داشتن اصول کیفیت توان توپولوژی اینورتر بکار رفته در این مقاله، یک اینورتر منبع ولتاژ با IGBT می باشد که قادر به کاهش ولتاژ در نقطه کوپل مشترک (PCC) است.

بر اساس استانداردهای بهره برداری از PV ، ضریب توان خروجی DG می‌بایست کنترل شده باشد تا مانع از تغییرات ناخواسته در ولتاژ شود. خواهیم دیدکه در صورت کنترل و تنظیم مناسب، توان راکتیو می تواند در امر تنظیم ولتاژ کمک کننده باشد. روش هایی که بر تنظیم ضریب توان بر روی واحد تمرکز دارد منجر به تولید صرفاً توان اکتیو می‌شوند. در این خصوص منابع تولید پراکنده با واسطه اینورتر قادر به کنترل توان راکتیو خروجی به صورت مستقل و در محدوده ظرفیت

۱) Incremental- Conductance
۲) Perturb & Observe

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]

اینورتر می باشند. به این ترتیب بدون کاهش در تولید توان اکتیو در محدوده ظرفیت در دسترس اینورتر، توان راکتیو تولید می‌شود که برای مصرف کننده از نظر امکان فروش توان تولیدی مازاد نیز سودمند نخواهد بود.

در سیستم های متصل به شبکه با مقیاس گسترده که تا چندین مگاوات برق تولید می‌نمایند، شبکه در نقش یک بانک ذخیره کننده انرژی با ظرفیتی نامحدود عمل می نماید. بنابراین ظرفیت نامحدودی به صورت مجازی وجود دارد که می تواند نقش باتری را ایفا نماید. مانند آنچه در کاربردهای نصب مستقل از شبکه اتفاق می افتد. از طرفی باتری های سیستم‌های PV گاهی کاملاً شارژ می شوند. بنابراین مازاد انرژی تولید شده می تواند سرریز گردد.

در طول چندین دهه، پیشرفتهای رخ داده در کلیدزنی عناصر نیمه هادی و استفاده از تکنولوژی تریستورهای کموتاسیون اجباری را پیش کشیده است. از آن جمله می توان به SVC، TCSC و HVDC اشاره نمود. همچنین نسل جدید ادوات FACTS به عنوان تکنولوژی کموتاسیون طبیعی (GTOs, IGBTs) همچون STATCOM، SSSC ، UPFC و VSC-HVDC تست شده و به نظر کاربردی می آیند. ایده این مقاله کاربرد اجزا سیستم PV در نقش یک نمونه از ادوات FACTS برای مثال STATCOM جهت کنترل ولتاژ و توان راکتیو می باشد.

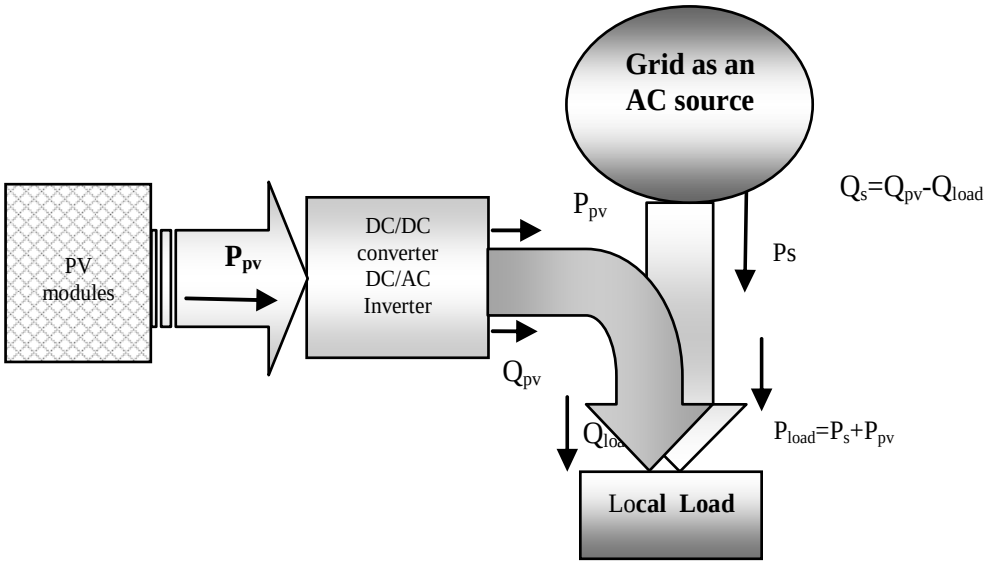
با توجه به آنچه در این بخش مورد بحث قرار گرفت، روش جدید کنترلی را پیشنهاد می دهیم که با مطالعه پروفیل ولتاژ، هدف تنظیم ولتاژ در محدوده مجاز و کاهش تلفات توزیع به کمترین مقدار ممکن را دنبال می نماید. در روش پیشنهاد شده یک مطالعه ۲۴ ساعته (یک روزه) برای سیستم فتوولتائیک نصب شده، بر اساس پیش بینی بار و توان تولیدی PV انجام گرفته است. توان راکتیو خروجی اینورتر واسطه، نه تنها برای کاهش انحرافات ولتاژ از مقدار مرجع، بلکه برای تنظیم و تثبیت مقدار ولتاژ بر روی مقدار مشخص کنترل می شود. این بدان معناست که مقادیر مرجع ولتاژ با توجه به توان راکتیو مورد نیاز جهت تثبیت ضریب توان محاسبه می شوند.

از دید اینورتر و PCC دو مد کنترلی متفاوت را می توان متصور بود که عبارتند از: مد کنترلی ولتاژ و مد کنترلی جریان. به دلیل طبیعت متغیر تابش خورشید، تغییرات توان خروجی منجر به برخی اضافه ولتاژ های ناخواسته در PCC می‌شود. به عبارت دیگر ضریب توان پایین در شبکه توزیع منجر به اضافه ولتاژ و نوساناتی می شود. در این راستا سیستم‌های کار آمد، سیستم هایی هستند که قادر به تزریق توام توان اکتیو و راکتیو به شبکه باشند. از ابتدای شکل گیری تکنولوژی فتوولتائیک بیشتر پروتکل های کنترلی با هدف تزریق جریان مطلوب به شبکه مطرح شده اند که مستلزم اعمال مد کنترلی جریان به اینورتر می‌باشد که از ایده تولید صرفاً توان اکتیو توسط PV نشات می‌گیرد. تعدادی از مطالعات

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]

تحقیقی موجودند که بر کنترل ضریب توان برای رسیدن به مقدار یک تاکید دارند و این به معنی که تنها توان اکتیو را به شبکه تزریق می‌نمایند [۳۴].

در شرایطی که بار محلی با مقادیر P_{load}وQ_{load} داشته باشیم، چنانچه هیچ توان راکتیوی توسط PV تولید نشود، PV تنها تأمین کننده توان اکتیو خواهد بود. بنابراین نسبت توان اکتیو و راکتیو بار به هم تا مقادیر قابل توجهی کاهش خواهد یافت و این منجر به کاهش ضریب توان باس محل نصب PV خواهد شد. همچنین در چنین شرایطی بخشی از ظرفیت خطوط توزیع می بایست جهت انتقال توان راکتیو مورد نیاز بار به محل مصرف اشغال گردد. این پدیده نیز منجر به بالارفتن تلفات و توان راکتیو در چرخش، در خطوط می شود که مضراتی را به دنبال خواهد داشت. چنانچه در شکل (۲) به تصویر کشیده شده است، در راه حل پیشنهادی این مقاله سیستم تا حد توان، توان اکتیو تولید نموده و مضاف بر آن بر اساس نیاز کنترل ولتاژ در PCC توان راکتیو نیز تولید می نماید.



شکل ۲: شرایط پخش بار در حضور بار محلی

ب ـ نحوه تعریف باس محل نصب PV در شبکه منتخب

در محاسبات پخش بار هر باس شبکه پارامترهای الکتریکی می بایست با توجه به چگونگی کنترل، تعریف شوند. در این شرایط کنترل PCC یک موضوع اساسی به شمار می آید. چنانچه قبلاً توضیح داده شد تا کنون اکثر روشهای کنترل

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]

اینورترهای فتوولتائیک برای کنترل جریان و با هدف نگه داشتن ضریب توان روی مقدار واحد طراحی شده اند. اما در این تحقیق ایده جدیدی پیشنهاد شده است که به تولید توام حداکثر توان اکتیو ممکن و توان راکتیو به شبکه اشاره دارد. و حقیقت جبران توان راکتیو در جهت کنترل ولتاژ می باشد که مد کنترلی ولتاژ نامیده می شود. با به کار گیری مد کنترل جریان باس PQ و با اعمال مد کنترلی ولتاژ باس PŪ در محاسبات پخش بار خواهیم داشت.

تغییرات ولتاژ تا حد زیادی به مدل بار، ساختار شبکه و مد کنترلی سیستم فتوولتائیک وابسته است. بازه استاندارد خطای ولتاژ ۵٪± می باشد و هدف رسیدن به مسطح ترین پروفیل ولتاژ ممکن می باشد. مولدین توان PV متصل در حالت تولید توان بالا و یا ماکزیمم تابش یا شرایط بار سبک می تواند به صورت معکوس بر پروفیل ولتاژ تاثیر داشته باشد. بنابراین با ارائه روش جدیدی برای کنترل PCC، تاثیر تزریق توان فتوولتائیک در سیستم های توزیع در بخش بعد مطالعه می شود.

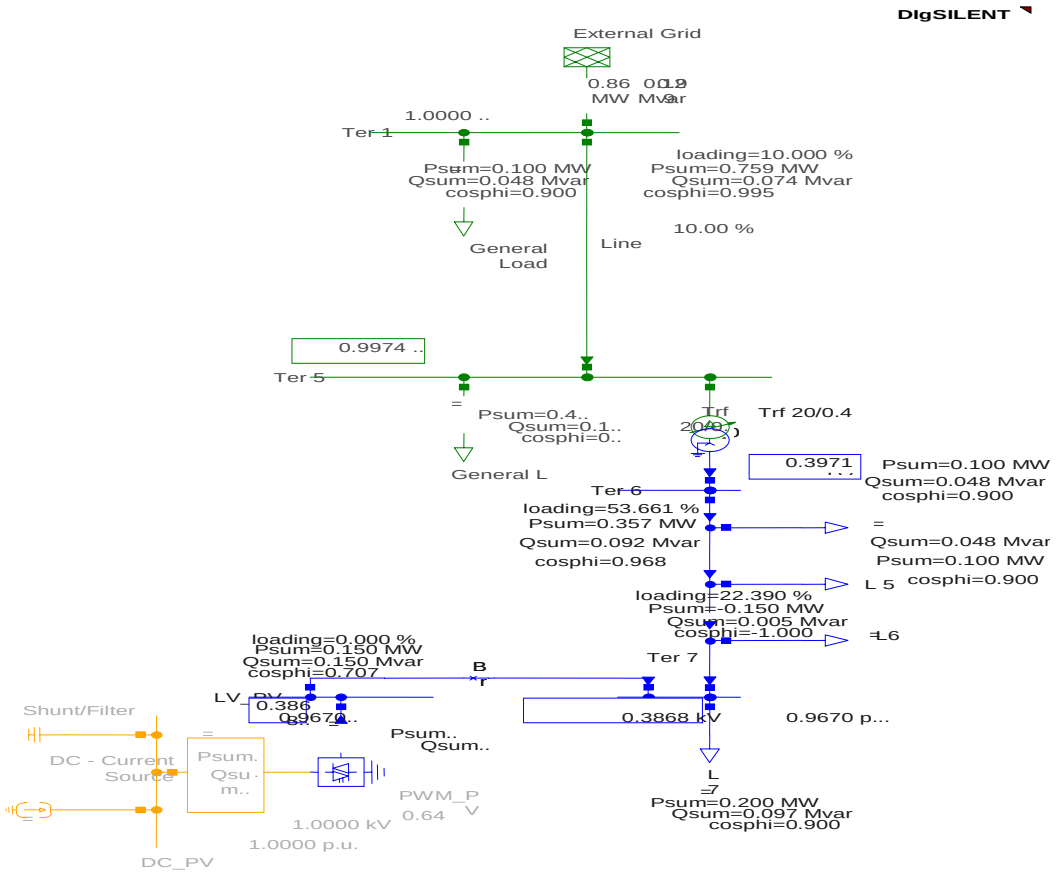
ب ـ مد *PQ*

منابع تولید پراکنده معمولاً به عنوان منابع توان با مقادیر ثابت توان اکتیو و راکتیو در نظر گرفته شده و با رفتار خاص خودشان معرفی می شوند. در روش نیوتون رافسون، شینه های بار به عنوان شینه های PQ ثابت معرفی می شوند. بنابراین وقتی یک سیستم PV به شینه بار متصل می شود، توان تولیدی قبل از اجرای محاسبات پخش بار به مقادیر پیشین توان اکتیو و راکتیوشین بار مذکور افزوده می شود. کنترل معمولا به گونه ای صورت می گیرد که هیچ توان راکتیوی تولید نمی‌شود و ضریب توان منتجه PV در حدود یک است. این شیوه کنترل مشکلات متعددی را دارا می‌باشد که بدان اشاره خواهد شد.

ج ـ مد *PU*

این تکنیک در حقیقت کنترل ولتاژ PCC باس فتوولتائیک در یک نقطه تنظیم خاص است. در این شرایط توان راکتیو خروجی PV توسط شبکه متصل به آن تعریف می شود. در الگوریتم نیوتون رافسون با اعمال مد کنترلی PŪ برای باس فتوولتائیک ولتاژ خروجی در محدوده مجاز تثبیت می شود و این محدوده برای توان راکتیو تعریف می گردد. در این راستا ولتاژ خروجیPV توسط تزریق توان راکتیو ثابت نگه داشته می‌شود. شکل (۳) شبکه شعاعی که مطالعه روی آن صورت گرفته را نشان می دهد، که در نرم افزار DIgSILENT پیاده سازی شده است. چنانچه از شکل برداشت می شود، بخش MPPT , DC سیستم فتوولتائیک با یک منبع جریان DC کنترل شده که به صورت موازی با یک خازن، که همان خازن باس DC می باشد مدل شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]



شکل ۳: شبکه شعاعی جهت انجام مطالعات حالت گذرا

اعمال مد کنترلی PQ ثابت برای شینه محل نصب PV در محاسبات پخش بار پاره ای مشکلات را به وجود می آورد. کنترل PV با هدف تزریق ماکزیمم توان اکتیو ممکن توام با تزریق توان راکتیو لازم جهت تثبیت ولتاژ در PCC شین محل نصب PV را به عنوان شین PŪ در محاسبات پخش بار معرفی می نماید. این نوع کنترل ضریب توان را در باس محل نصب PV بالا می برد.

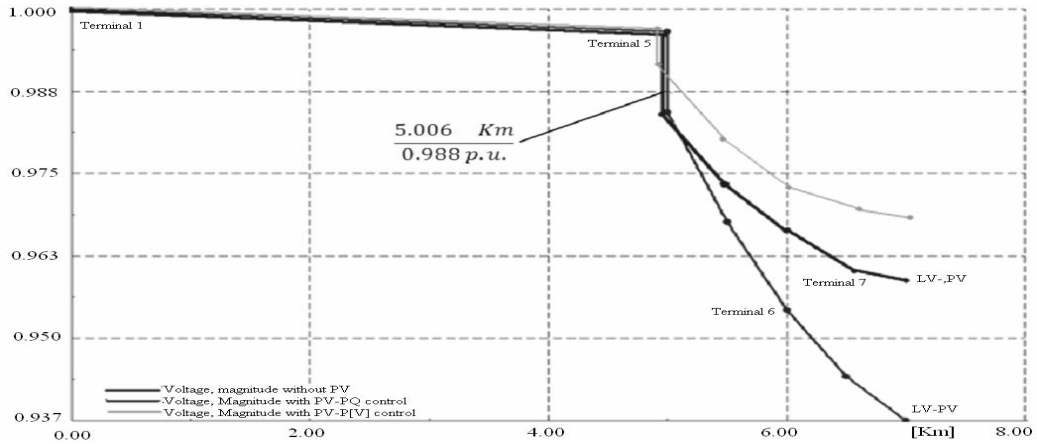
منبع جریان کنترل شده قابلیت دریافت فرمان خروجی به صورت یک منحنی را دارا می‌باشد. بنابراین تغییرات دینامیکی در وضعیت‌های مختلف در بخش DC را می توان با یک منحنی در ورودی آن در نرم افزار DIgSILENT مدل نمود. توان DC تولید شده از طریق یک اینورتر DC/AC به توان AC مورد نظر تبدیل می‌شود و به گونه‌ای تنظیم

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]

و کنترل می شود تا شینه مذکور را به یک شین PŪ تبدیل نماید. یک واحد فتوولتائیک با توان تولیدی ۱۵۰kW خروجی جهت مطالعات حالت گذرا و بررسی نقش PV در شبکه در نظر گرفته می شود.

طبیعت متغیر تابش خورشید به صورت یک منحنی ورودی به دست آمده و به عنوان ورودی منبع جریان کنترل شده به سیستم اعمال می شود. در این حالت توان DC خروجی از وضعیت تابش تبعیت می‌کند در ادامه شرایط مطالعاتی مختلف همچون شرایط سایه، اتصال کوتاه در ترمینال های PV، تغییرات ناگهانی بار و قطع ارتباط PV از شبکه مطرح شده و مورد تحلیل قرار می گیرد. در شکل (۳) شبکه شعاعی منتخب جهت انجام مطالعات حالت گذرا ارائه شده است. ترمینال شماره ۷ به دو دلیل اصلی جهت نصب PV انتخاب شده است. اول آنکه این نقطه از لحاظ الکتریکی دورترین نقطه از منبع شبکه می باشد و دوم اینکه با توجه به پروفیل ولتاژ، ولتاژ باس ۷ از محدوده مجاز ولتاژ پایین تر قرار گرفته است.

در شکل (۴) پروفیل ولتاژ شبکه تحت بررسی نمایش داده شده است. مقدار ولتاژ حوالی ترمینال شماره ۷ از استاندارد ۵٪± کمتر می باشد. بعد از تزریق توان PV تغییرات در دو روش کنترل مجزای PŪ و PQ تجزیه تحلیل و مقایسه قرار گرفته و پروفیل ولتاژ بعد از ورود توان PV نیز رسم شده است. چنانچه از منحنی های شکل (۴) مشهود است پروفیل ولتاژ به اندازه چشمگیری بهبود یافته و در محدوده مجاز استاندارد تغییرات ولتاژ قرار گرفته است. با مقایسه دو روش کنترلی متفاوت چنین به نظر می آید که با وجود اینکه هر دو روش کنترلی پروفایل ولتاژ را بهبود می دهند، اما در کنترل به روش PŪ بهبود به مراتب بیشتری اتفاق می افتد.

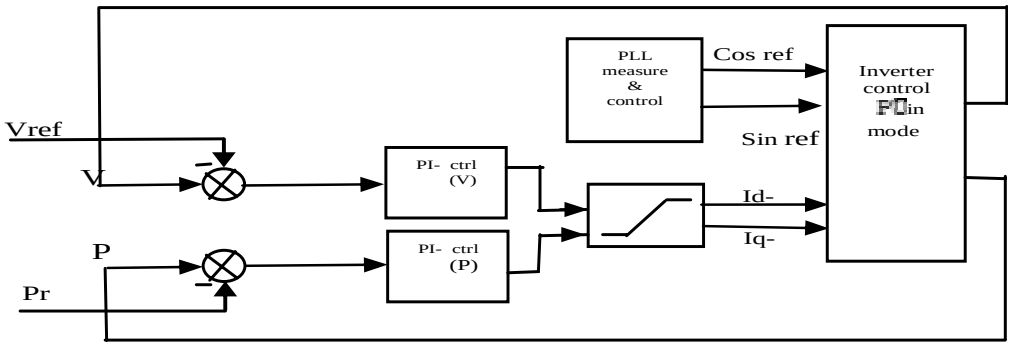


شکل ۴: پروفیل ولتاژ بدون PV، با روشهای کنترلی PQ و PŪ

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]

اعمال روش های کنترلی نشان می دهد که هر دو روش نتایج مشابهی را با میزان مختلف در بهبود عملکرد شبکه ایفا می کنند اما در صورت اعمال مد کنترلیPQ ثابت و عدم تولید توان راکتیو مشابه روش کنترلی PŪ اگر بخواهیم به پروفایل ولتاژ مشابهی برسیم، می بایست تعداد بسیار بیشتری ماژول PV در بخش DC نصب نمائیم تا توان اکتیو بیشتری تزریق شود. در نظر گرفتن مسائل اقتصادی در این امر در کنار امکان انتخاب اینورتری با ظرفیت پایین تر و به تبع آن قیمت کمتر ما را به انتخاب مد کنترلی PŪ سوق می دهد.

مدار کنترلی پیشنهادی برای اعمال مد کنترلی PŪ در سیستم های فتوولتائیک مانند آنچه در این مطالعه صورت گرفته است در شکل (۵) نمایش داده شده است.



شکل ۵: بلوک دیاگرام کنترل PCC به عنوان یک شینه PŪ

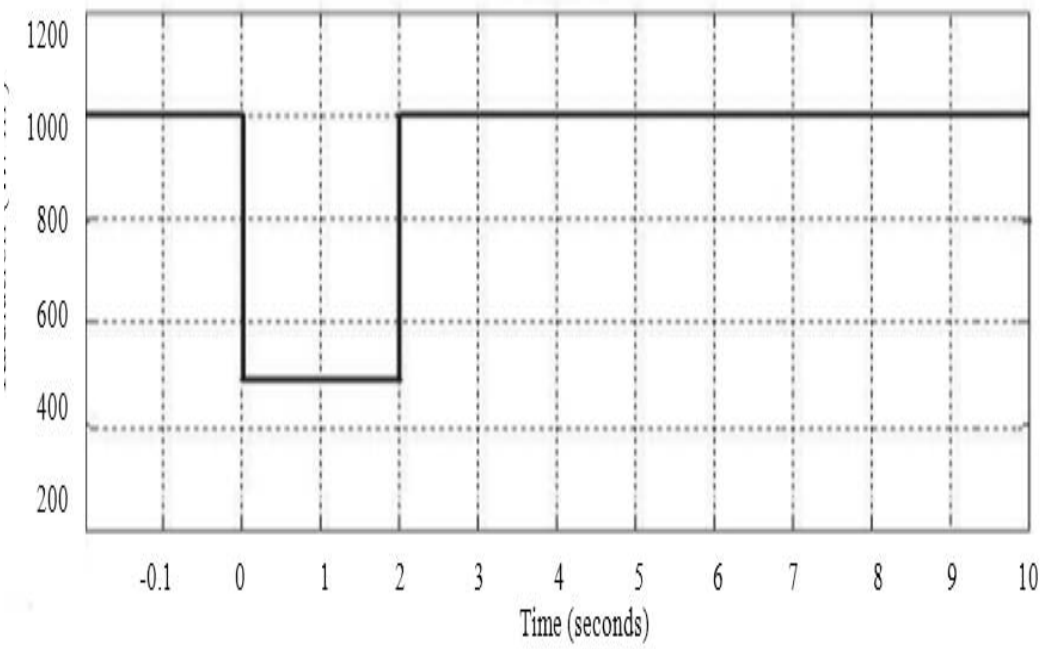
سیستم ارائه شده منجر به بالا رفتن بازده تبدیل می شود. به این ترتیب که علاوه بر فراهم نمودن یک منبع توان راکتیو، در هنگام عدم حضور خورشید به عنوان یک جبران کننده توان راکتیو نیز عمل می نماید. کنترل با اعمال بردار ولتاژ به عنوان مرجع و همچنین یک حلقه کنترلی خارجی از کارایی مناسبی برخوردار است.

نتایج شبیه سازی

الف ـ رخ‌دادهای مربوط به تابش

برای مطالعه رخ دادهای مربوط به تابش خورشید، شرایط سایه در نظر گرفته و پارامترهای الکتریکی شبکه در شین محل نصب PV مورد توجه قرار گرفته اند. برای مدل سازی شرایط متغیر جوی، تغییرات به منبع جریان کنترل شده توسط منحنی ورودی نمایش داده شده در شکل (۶) اعمال می شود. همانطور که مشهود است افت تابشی تا نصف تابش ماکزیمم در لحظه صفر شروع شده و تا دو ثانیه تداوم می یابد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]



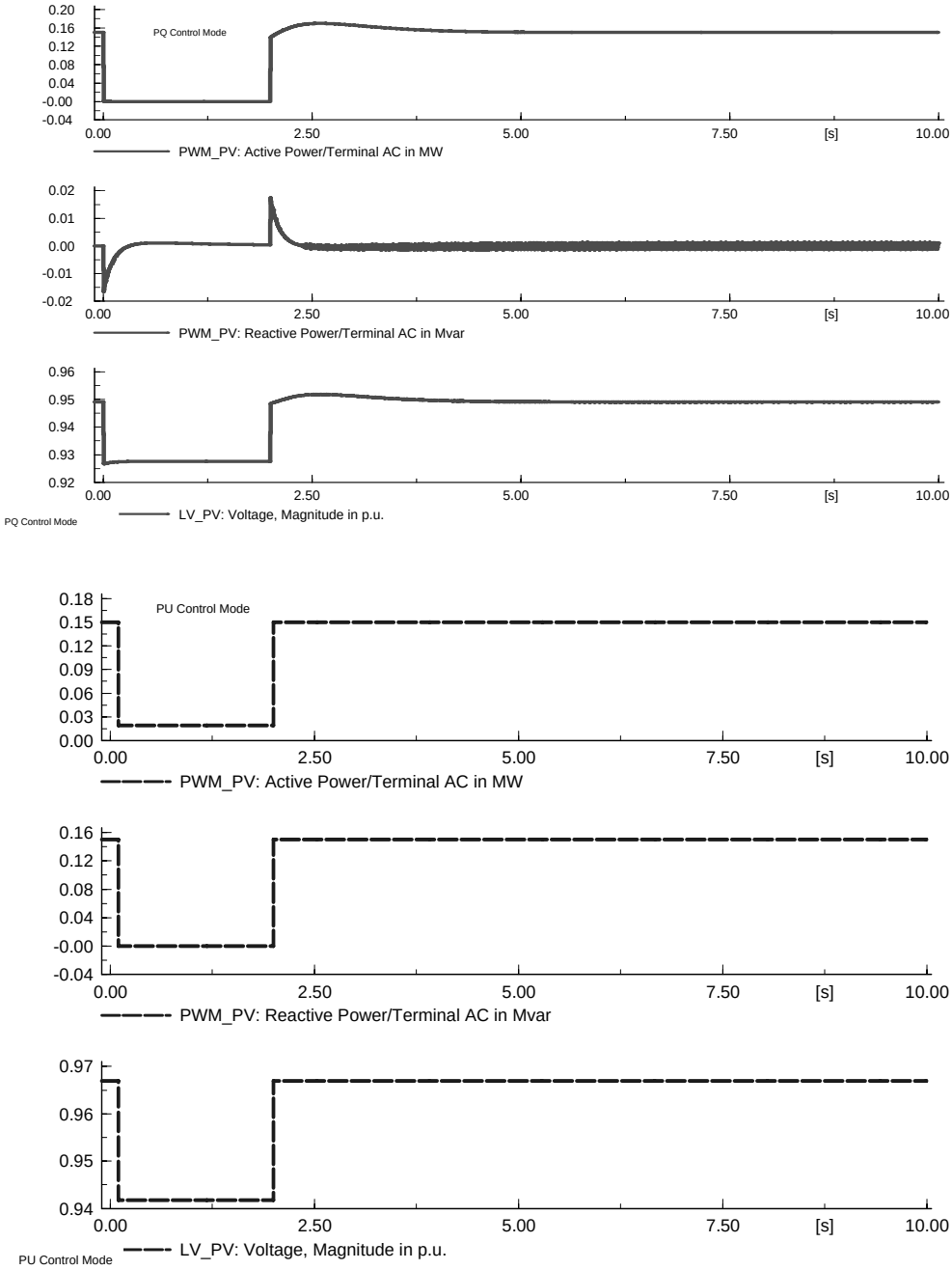
شکل ۶: منحنی ورودی برای مدلسازی شرایط سایه (تغییر تابش)

جهت پیاده سازی صحیح ایده پیشنهادی انتخاب ظرفیت اینورتر و کنترل خروجی ها به صورت دقیق ضروریست. در این راستا برای تحویل ماکزیمم توان اکتیو در دسترس PV، ظرفیت اینورتر را دو برابر ظرفیت توان اکتیو عبوری سیستم در نظر می گیریم. بدین ترتیب جهت تزریق توان راکتیو از سهم عبور توان اکتیو کاسته نمی شود. ضمن اینکه با کنترل توان راکتیو خروجی های به مراتب بهتری نسبت به مد کنترلی PQ ثابت به دست می آید.

در شکل (۷) پاسخ سیستم به تغییرات ورودی برای هر دو مد کنترلی نمایش داده شده و مشاهده می شود که این خروجی برای مد کنترلی PŪ بهتر عمل می نماید. تغییرات ولتاژ باس DC نیز در شکل شماره (۸) نمایش داده شده اند.

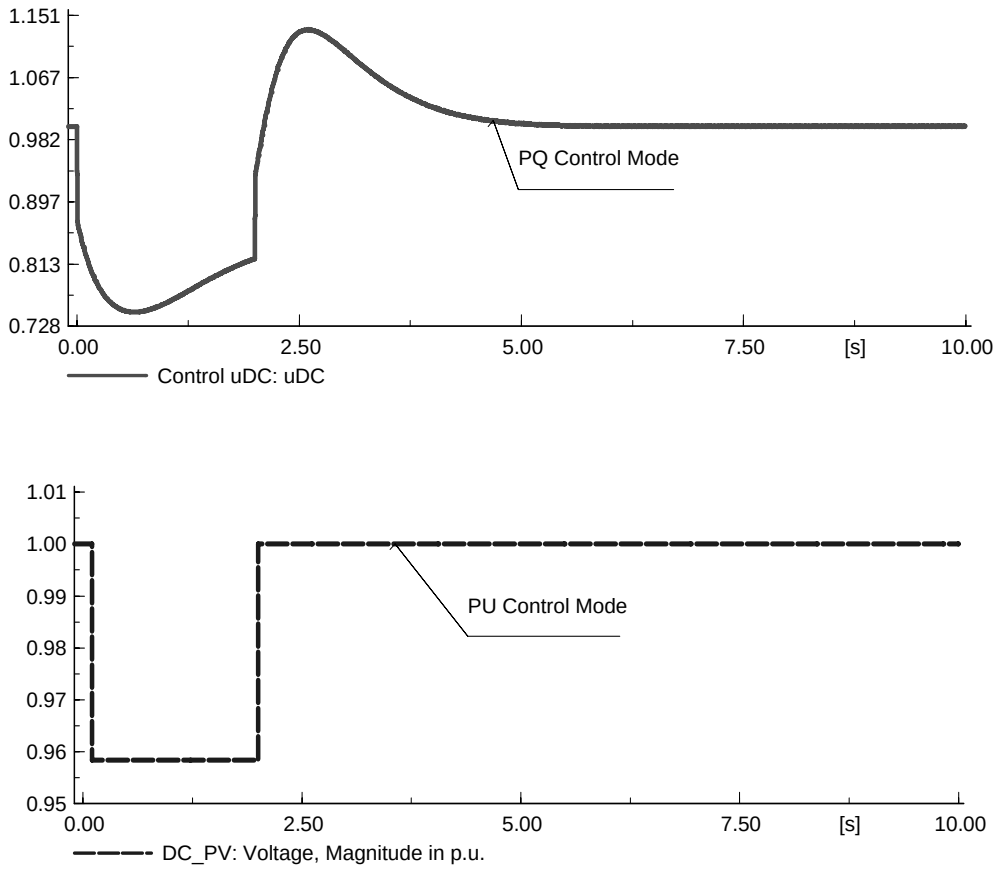
با توجه به منحنی بالا چنین نتیجه گرفته می شود که با کنترل به روش PŪ به کنترل سریعتر و مناسبتری دست خواهیم یافت و این مد کنترلی ولتاژ را در شرایط افت تابش در سطح بالاتری نسبت به مد PQ نگه می دارد. به عنوان نتیجه برای داشتن کنترل بهتر بر ولتاژ DC مد کنترل PŪ مناسب تر است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]



شکل ۷: توان اکتیو، توان راکتیو و پاسخ های ولتاژ برای تابش خورشید تحت مدهای کنترلی PQ و PŪ

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]



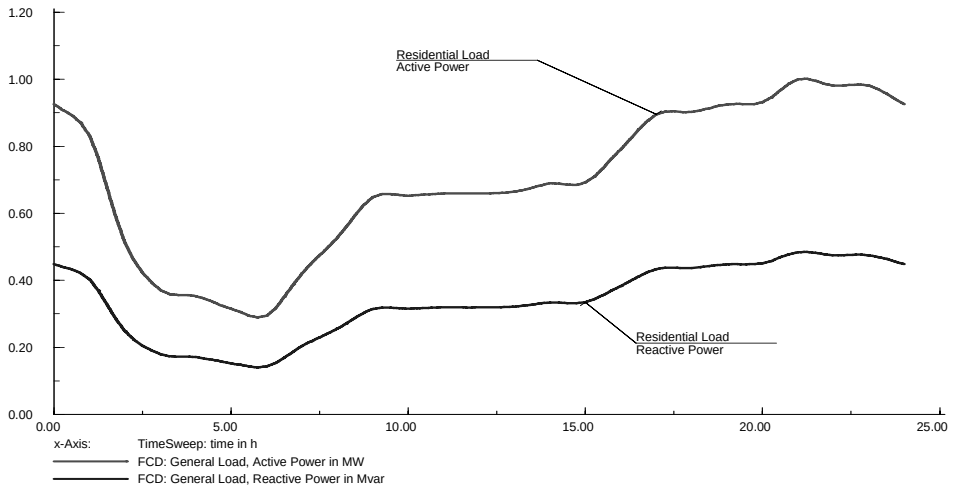
شکل ۸ : ولتاژ باس DC در هر دو مد کنترلی

ب ـ مطالعه سیستم PV معرفی شده در حضور پروفیل‌های بارهای مختلف

ایده اصلی این مطالعه تولید توان راکتیو همراه با تولید توان اکتیو در راستای کنترل ولتاژ می باشد. این هدف تا پیش از این با نصب ادوات FACTS نظیر SVC یا STATCOM دنبال میشد که هزینه های بالایی را نیز به سیستم ها تحمیل می نمود. در تکنولوژی فتوولتائیک، بسیاری از تجهیزات موجود در یک نمونه سیستم STATCOM را می توان یافت. با اعمال مد کنترل ولتاژ به اینورتر سیستم فتوولتائیک و طراحی حساب شده و هدفمند تک تک عناصر پسیو به ایده تزریق توان راکتیو توسط سیستم فتوولتائیک دست خواهیم یافت. در این

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]

راستا این مقاله روش کنترلی را پیشنهاد می دهد. نکته مهم در این باب انتخاب نقطه تنظیم مناسب جهت کنترل ولتاژ و مقدار مرجع می باشد. به این ترتیب سیستم فتوولتائیک به صورت توام STATCOM و منبع توان اکتیو عمل می نماید. برای ارزیابی عملکرد سیستم فتوولتائیک با در نظر گرفتن طبیعت متغیر تابش خورشید مطالعه ۲۴ ساعته بر سیستم اعمال شده است. همچنین پروفیل بار واقعی برای تکمیل ارزیابی سیستم در نظر گرفته شده است که یکی پروفیل بار مسکونی می باشد. این مدل بار در شکل (۹) نمایش داده شده اند. پارامترهای شبکه برای هر یک از دومد کنترلی PQ ثابت و PŪ برای این مدل بار ارزیابی شده اند.



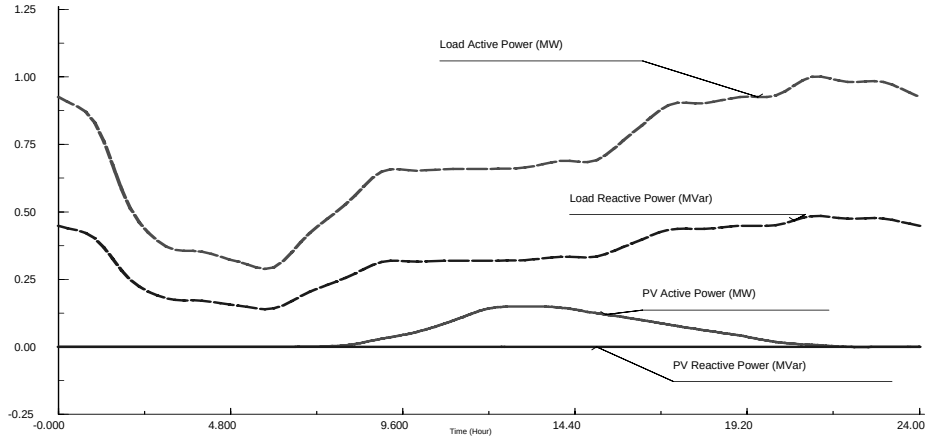
شکل ۹: پروفیل بار واقعی برای مشترکین مسکونی [35]

ب ـ۱ـ مطالعه سیستم فتوولتاییک برای یک بار مسکونی و مد کنترل PQ ثابت برای PV

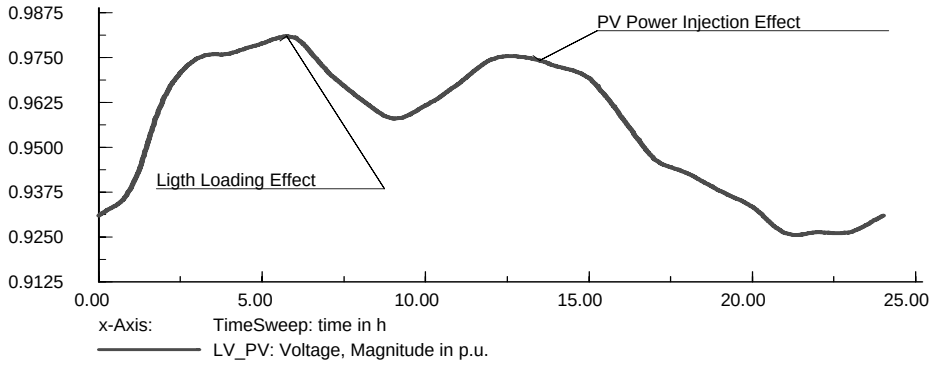
در حالت مد کنترلی PQ ثابت میزان توان راکتیو تولیدی توسط PV روی صفر تنظیم شده و تنها توان اکتیو تولید می شود.

تزریق توان اکتیو از PV به شبکه، منجر به بهبود ولتاژ PCC و افزایش ضریب توان می شود که در شکل (۱۰) الف– ج نشان داده شده است.

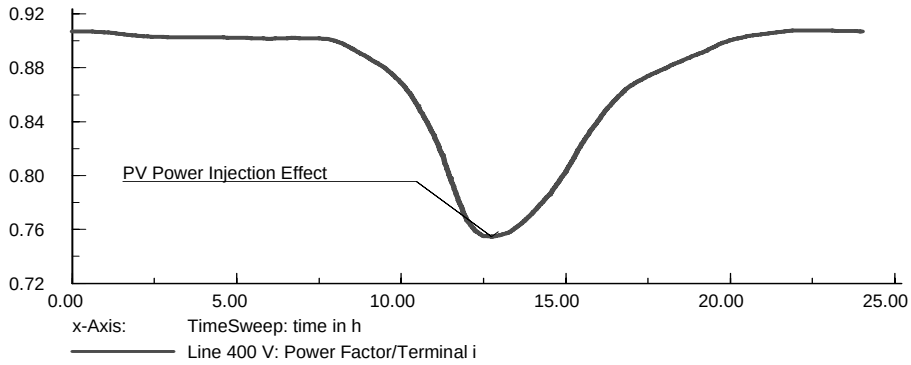
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]



(الف)



(ب)

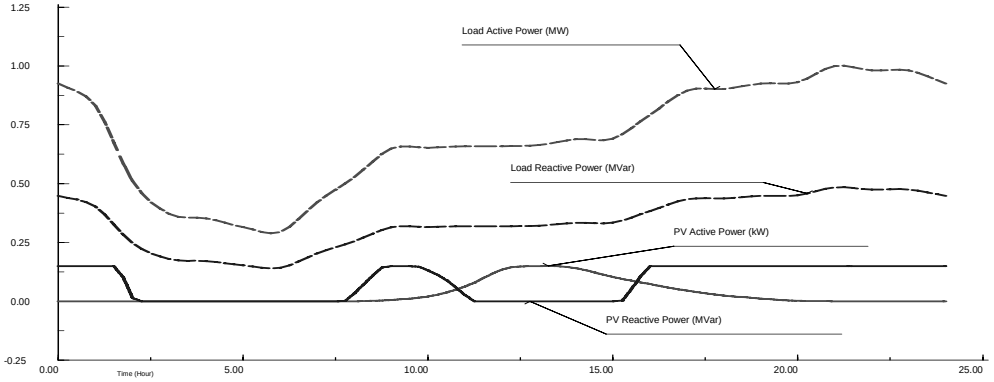


(ج)

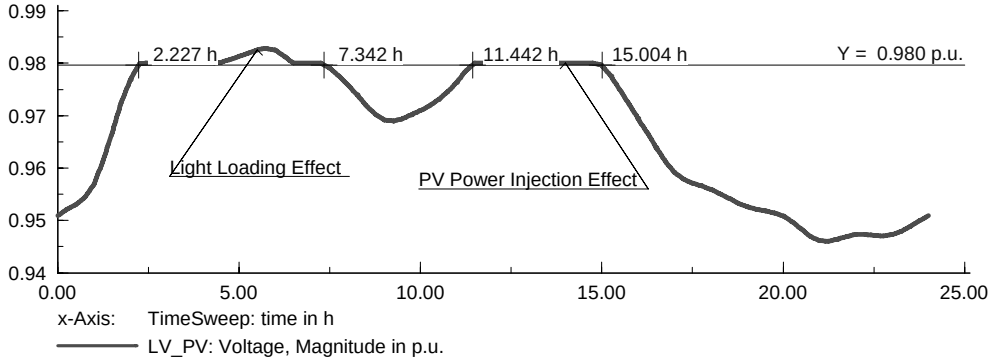
شکل ۱۰: الف-بار مسکونی نمونه و توان PV. ب- تلفات توان شبکه ج- ولتاژ PCC د- ضریب توان

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]

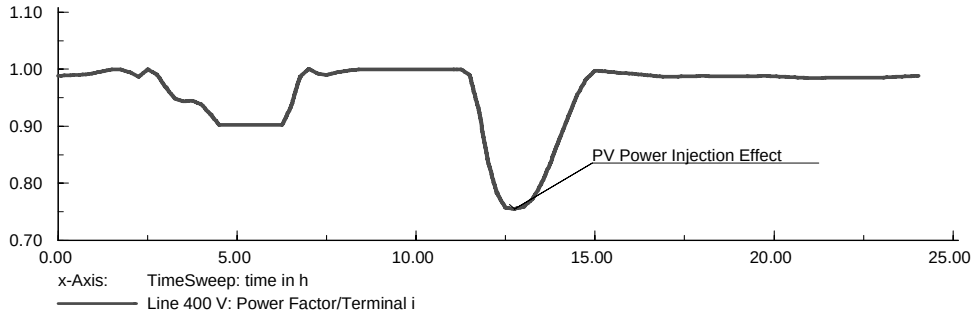
ب -۲- مطالعه بار مسکونی و مد کنترل PŪ برای PV



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۱: الف- تبادل توان اکتیو و راکتیو بین PV شبکه ب- تلفات شبکه ج- ولتاژ PCC د- ضریب توان

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]

نتیجه گیری

ایده اصلی این مطالعه به کنترل ولتاژ در PCC توسط اعمال مد کنترلی PŪ به اینورتر سیستم فتوولتائیک می باشد که روش مناسبی برای کنترل و نصب سیستم های فتوولتائیک می باشد. به علاوه، مد کنترلی PŪ با تکیه بر نتایج به دست آمده از شبیه سازی روش بسیار مناسبتری می باشد. این روش کنترلی در مقایسه با مد کنترلی PQ ثابت که هیچ توان راکتیوی تولید نمی شود و با نام مد کنترل جریان معروف است مناسب تر است. ایده جبران توان راکتیو، به نوعی همان بازسازی تئوری STATCOM می‌باشد که با استفاده از ادوات FACTS انجام می شود. از آنجا که کلیه تجهیزات یک STATCOM در ساختار سیستم فتوولتائیک موجود است و با توجه به مطالعات انجام شده در این تحقیق پیشنهاد می گردد تا از سیستم PV به صورت یک منبع انرژی های تجدیدپذیر ترکیب شده با یک سیستم STATCOM درباس مناسب در شبکه بهره برداری گردد.

نکته مهم دیگر این که در برخی قسمتهای منحنی های ترسیم شده در موارد ارزیابی ارائه شده مشاهده می گردد که در محدوده هایی که توان راکتیو تغییر می کند و تولید و یا جذب می گردد، کنترل ولتاژ به صورت بسیار دقیق انجام می‌شود و مقدار آن دقیقاً روی نقطه تنظیم ۰/۹۸ p.u. حفظ می شود. این در حالی است که در محدوده هایی که محدودیت تولید و جذب توان راکتیو به وجود می آید تنها وضعیت بهبود ولتاژ را شاهد هستیم. بنابراین برای داشتن کنترل دقیق تر بر ولتاژ تزریق توان راکتیو ضروریست و هرچه ظرفیت تولید توان راکتیو بیشتر باشد کنترل بهتر انجام می شود که البته از حیث مسائل اقتصادی نیز می بایست بررسی گردد.

منابع

[1] M. M. Jovanovic and Y. Jang, “A new soft-switched boost converter with isolated active snubber,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 35, no. 2, pp. 496–502, Mar. 1999.

[2] C. M. C. Duarte and I. Barbi, “An improved family of ZVS-PWM active-clamping dc-to-dc converters,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 17, no. 1, pp. 1–7, Jan. 2002.

[3] R. J. Wai and R. Y. Duan, “High step-up converter with coupled inductor,”IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 5, pp. 1025–1035,May 2005.

[4] S. Kim, J. Jeon, C. Cho, J. Ahn, S. Kwon, Member, IEEE, “Dynamic Modeling and Control of a Grid-Connected Hybrid Generation System With Versatile Power Transfer”, IEEE Trans on Industrial electronics, Vol. 55, NO. 4, April 2008

[5] F. Valencaga, P. F. Puleston, and P. E. Battaiotto, “Power control of a solar/wind generation system without wind measurement: A passivity/ sliding mode approach,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 18, no. 4, pp. 501–507, Dec. 2003]

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]

[6] F. Valenciaga and P. F. Puleston, “Supervisor control for a standalone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 2, pp. 398–405, Jun. 2005.

[7] Y. Huang, M. Shen, Student Member, IEEE, Fang Z. Peng, Fellow, IEEE, and Jin Wang, Member, IEEE,” Z-Source Inverter for Residential Photovoltaic Systems”, IEEE Trans on Power electronics, Vol. 21, NO. 6, November 2006.

[8] J. Min Kwon, K. Nam, Member, IEEE, and B. Kwon, Member, IEEE,”Photovoltaic Power Conditioning System With Line Connection”, IEEE Trans on Industrial electronics, Vol. 53, NO. 4, August 2006.

[9] K. Narender Reddy and Vivek Agarwal, Senior Member, IEEE, “Utility-Interactive Hybrid Distributed Generation Scheme With Compensation Feature”, IEEE Trans on Energy Conversion, Vol. 22, NO. 3, September 2007.

[10] A. Ch. Kyritsis, Student Member, IEEE, E. C. Tatakis, and N. P. Papanikolaou ,’Optimum Design of the Current-Source Flyback Inverter for Decentralized Grid-Connected Photovoltaic Systems’ , IEEE Trans on Energy Conversion, Vol. 23, NO. 1, March 2008.

[11] L. Hassaine a,b,*, E. Olias a, J. Quintero a, M. Haddadi b“Digital power factor control and reactive power regulation for grid-connected photovoltaic inverter”a Power Electronics Systems Group, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. de la Universidad 30, 28911 Legane´s, Madrid, Spain b Ecole Nationale Polytechnique, Hassen Badi, El Harrach, Alger, Algeria.

[12] R. González, E. Gubía, Member, IEEE, J. López, Member, IEEE, and L. Marroyo, Member, IEE,”Transformerless Single-Phase Multilevel-Based Photovoltaic Inverter”, IEEE Trans on Industrial electronics, Vol. 55, NO. 7, July 2008.

[13] R. J. Wai, Senior Member, IEEE, and W. H. Wang ,’ Grid-Connected Photovoltaic Generation System’, IEEE Trans on Circuits and System regular papers, Vol. 55, NO. 3, April 2008.

[14] J. Selvaraj and N. A. Rahim, Senior Member, IEEE,’ Multilevel Inverter For Grid-Connected PV System Employing Digital PI Controller’, IEEE Trans on Industrial electronics, Vol. 56, NO. 1, January 2009.

[15] A.Canova, L. Giaccone, F. Spertino, Member, IEEE, and M. Tartaglia, Senior Member, IEEE ,“Electrical Impact of Photovoltaic Plant,in Distributed Network” IEEE Trans on Industrial Applications, Vol. 45, NO. 1, January 2009.p.341.

[16] standard EN 50160.

[17] Z.D. Zimmerman, "Comprehensive Distribution Power Flow: Modeling, Solution Algorithms and Analysis,", Cornell University, Agust . 1998.

[18] S.M.Primen, ” Power Quality Problems and Renewable Energy Solutions’ ,Analysis of the Prospects for Renewable PQ Solutions, in Massachusetts’2006.

[19] E.V. Solodovnik, S. Liu, “Power Controller Design for Maximum Power Tracking in Solar Installations,” IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 19, No. 5, pp 1295-1304 Sep. 2004.

[20] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N. C. Voulgaris, “Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 16, pp. 46–54, Jan. 2001.

[21] C. Hua, J. Lin, C. Shen, “Implementation of a DSP-Controlled Photovoltaic System with Peak Power Tracking,” IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 45, Feb. 1998.

[22] E.V. Solodovnik, S. Liu, “Power Controller Design for Maximum Power Tracking in Solar Installations,” IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 19, No. 5, pp 1295-1304 Sep. 2004.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]

[23] K. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, “Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions,” Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 142, no. 1, pp. 59–64, Jan. 1995.

[24] Kasa, N.; Iida, T.; MAjumdar, G.; “Robust control for maximum power point tracking in photovoltaic power system,” Power Conversion Conference, 2002. PCC Osaka 2002. Proceedings of the, Vol. 2, pp. 827-832, April 2002.

[25] Chihchiang Hua; Chihming Shen; “Study of maximum power tracking techniques and control of DC/DC converters for photovoltaic power system,” Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE, Vol. 1, pp. 86-93, May 1998.

[26] Hussein, K.H.; Muta, I.; Hoshino, T.; Osakada, M.; “Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions,” Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, Vol. 142, No. 1, pp. 59-64, Jan. 1995.

[27] C. Hua, J. Lin, C. Shen, “Implementation of a DSP-Controlled Photovoltaic System with Peak Power Tracking,” IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 45, Feb. 1998.

[28] M. Hashemi Nmain, S. Afsharnia," Controlling Grid tied photovoltaic system, concerning maximum power point tracking & PCC voltage control ", EPE-PEMC 200813th International Poawer Electronis and motion control conference, , IEEE, Poznan, Poland.

[29] M. Hashemi Nmain, S. Afsharnia,"Grid-Connected PV with Maximum Power Point tracking techniques implemented in Real case study of variable radiation",Eleventh IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics COMPEL2008), Zurich, Switzerland.

[30] M. Hashemi Nmain, V. Salehi, S. Afsharnia," Large scale Photovoltaic power generation Modeling, Control method and Analyzing “ ICCEP 2009, International Conference on Clean Electrical Power ,Renewable Energy Resources Impact, Capri , Italy.

[31] M. Hashemi Nmain, V. Salehi, S. Afsharnia, “Novel control methods for grid connected photovoltaic system” , 34 th PVSC , photovoltaic specialist conference, Philadelphia, USA, 2009.

[32] IEEE 929-2000 Standard—IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic Systems.

[33] IEEE 1547 Standard for Interconnecting Distributed Resources with the Electric Power System.

[34] H. ZELAYA DE LA PARRA, I.J. IGLESIAS, O. GONZALEZ, J.M. SOLANA, J. TAMARIT, ”Modulation and Control of Current Source Converters for high dynamic Performance of Induction Motors”, Proceedings of the 7th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 97), Trondheim, Norway 8-10 September 1997, pp. 3.756-3.761.

[35] Adedamola Omole, Analysis, Modeling and Simulation of Optimal Power Tracking of Multiple- Modules of Paralleled Solar Cell Systems, The Florida state university college of engineering, Master of Science, Fall Semester, 2006.

[36] S. Golder,Photovoltaic Generator Modeling for Large Scale Distribution System Studies”,Master of science Thesis in Electrical Engineering, Drexel University, October 2006

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-11]