

## Voltage Regulation in Low Voltage Distribution Networks by Control Capability of Photovoltaic Systems Inverters - A Review

Mohammad Javad Ramezan<sup>1</sup>, *M.Sc Student*, Seyed Fariborz Zarei<sup>1</sup>, *Assistant Professor*,  
Mohammad Amin Ghasemi<sup>2</sup>, *Assistant Professor*, Ehsan Heydarian-Forushani<sup>1</sup>, *Assistant Professor*

<sup>1</sup>.Department of Electrical and Computer Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

<sup>2</sup>.Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, BuAli Sina University, Hamedan, Iran

### Abstract:

The high penetration of Photovoltaic (PV) systems in low-voltage distribution networks can, at times (especially during midday when peak power generation occurs and load demand is low), lead to issues within the distribution network. Among the most significant of these problems are power flow reversal and overvoltage conditions. Such issues can reduce the level of PV integration in distribution networks, which contradicts the principle of efficiency and maximizing renewable energy utilization. Therefore, to increase PV integration in such cases, various methods are used to mitigate overvoltage. This paper reviews these methods and explores the various control capabilities of intelligent PV inverters. Furthermore, it examines the advantages and disadvantages of each approach and how they can be combined to enhance efficiency. Finally, several highly effective combinations are presented, along with scenarios for the charging and discharging of energy storage systems used in these cases.

**Keywords:** Distribution network, Voltage regulation, Reactive power control, Coordination control, PV inverter

**Received:** 13 October 2024

**Revised:** 29 November 2024

**Accepted:** 10 February 2025

**Corresponding Author:** Dr. Seyed Fariborz Zarei: zareif@qut.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1193305>





## مروری بر تنظیم ولتاژ در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف از طریق کنترل اینورتر سیستم‌های فتوولتاییک

محمد جواد رمضان<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی/ارشد، سید فریبرز زارعی<sup>۱</sup>، استادیار، محمد امین قاسمی<sup>۲</sup>، استادیار، احسان حیدریان فروشانی<sup>۱</sup>، استادیار

۱-دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

۲-دانشکده مهندسی برق، دانشگاه بو علی سینا، همدان، همدان، ایران

**چکیده:** مشارکت بالای پنل‌های فتوولتاییک در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف، در برخی اوقات (مخصوصاً هنگام ظهر، که تولید توان پیک، توسط پنل‌ها صورت گرفته و سطح تقاضای بار کم است) می‌تواند باعث ایجاد مشکلاتی در شبکه توزیع گردد، که از جمله مهم‌ترین این مشکلات می‌توان به عکس شدن جهت توان و به وجود آمدن اضافه ولتاژ در شبکه توزیع اشاره کرد. بروز چنین مشکلات می‌تواند باعث کم شدن سطح مشارکت پنل‌های فتوولتاییک در شبکه‌های توزیع گردد، که با اصل بهره‌وری و استفاده حداکثری از انرژی‌های تجدیدپذیر منافات دارد، لذا به منظور افزودن سهم مشارکت پنل‌ها در این گونه موارد، از روش‌های مختلفی جهت کاستن اضافه ولتاژ به وجود آمده استفاده می‌گردد، که در این مقاله علاوه بر مروری بر روی آنها، به بررسی قابلیت‌های مختلف کنترلی اینورترتر هوشمند پنل‌ها پرداخته می‌شود. در ادامه به بررسی مزایا و معایب هر یک از این روش‌ها و چگونگی ترکیب آنها به منظور افزایش بازدهی پرداخته و چند نمونه ترکیب پر کاربرد با بازدهی بالاتر، به همراه سناریوهای شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره ساز انرژی مورد استفاده در این موارد نیز به طور خلاصه مورد بررسی قرار گرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** شبکه توزیع، تنظیم ولتاژ، کنترل توان راکتیو، هماهنگی کنترلی، اینورترتر پنل فتوولتاییک

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۲

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲

نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید فریبرز زارعی، zarei@qut.ac.ir

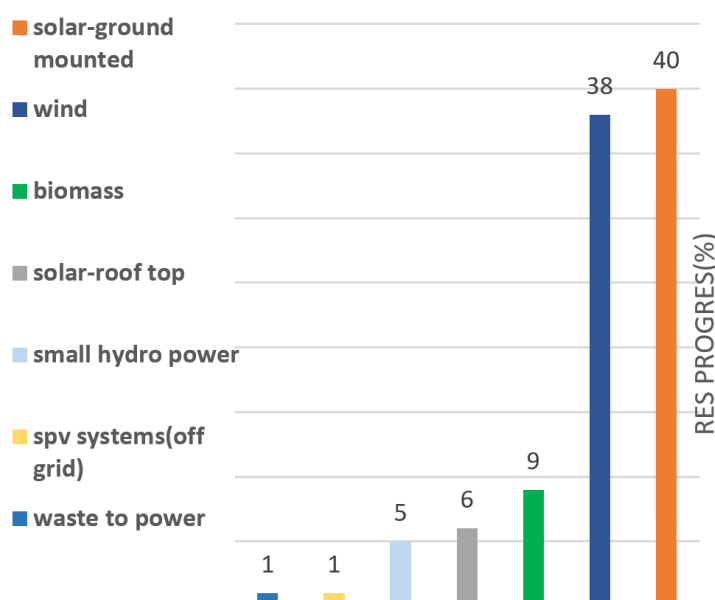
DOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1193305>





## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر یک نگرانی بزرگ در جهان، مقابله با افزایش گازهای گلخانه‌ای بوده است، لذا در این راستا اقداماتی همچون طرح‌های تشویقی تاسیس نیروگاه‌های تجدید پذیر<sup>۱</sup>، همانند نیروگاه‌های بادی و یا انرژی خورشیدی شکل گرفته است. به طور مثال در برخی از کشورهای اروپایی، از احداث نیروگاه‌های مقیاس کوچک که در نزدیکی مصرف کننده ها نصب می‌شوند و عمدتاً پنل‌های فتوولتاییک<sup>۲</sup> با سایزهای کوچک (کم کیلووات) هستند، حمایت می‌شود. از جمله سیاست‌های تشویقی‌ای که می‌تواند موجب افزایش مشارکت پنل‌های فتوولتاییک در شبکه‌های توزیع شود، می‌توان به مواردی همچون معافیت‌های مالیاتی، تخصیص یارانه‌ها و تسهیلات کم سود، و یا عقد قرارداد تضمینی خرید برق با مشارکت کننده ی آن اشاره کرد، که البته بررسی موارد فنی‌ای همچون سوابق شدت تابش نور خورشید در گیتا شناسی منطقه ی مورد نظر، و یا مواردی همچون دمای هوا در روزهای مختلف سال، می‌توانند باعث موثر واقع شدن مشوق‌های مذکور گردند. پیش بینی می‌شود که با تکثیر این نیروگاه‌های مقیاس کوچک در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف، کیفیت توان، مخصوصاً در مناطق روستایی بهبود یابد. به طور مثال، توان تولیدی این واحدها تا سال ۲۰۲۱، مقدار ۳۱۴ گیگاوات را به خود اختصاص داده است، که از این مقدار ۱۶۷ گیگاوات آن مربوط به تولید انرژی‌های خورشیدی بوده که بیشترین سهم تولید را در میان سایر منابع تجدید پذیر دارا می‌باشد. همچنین سهم انرژی تولیدی توسط باد ۹۳ گیگاوات و نیروگاه‌های آبی ۲۵ گیگاوات می‌باشد [۱].



شکل (۱): نمودار پیشرفت نیروگاه‌های تجدید پذیر تا سال ۲۰۲۲ [۲]

در ضمن، با توجه به گزارش سازمان بین‌المللی انرژی، تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۱۱ درصد از کل انرژی الکتریکی تولید شده در دنیا، توسط سیستم‌های فتوولتاییک تامین خواهد شد. اکثر این پنل‌های فتوولتاییک به شبکه‌های توزیع فشار ضعیف متصل می‌شوند که باعث حداقل شدن تلفات و افزایش قابلیت اطمینان شبکه خواهند شد. یکی از مهمترین دلایل برتری استفاده از انرژی خورشیدی نسبت به سایر منابع انرژی تجدیدپذیر، این است که هزینه تولید توان خورشیدی رفته رفته در حال کاهش پیدا کردن است. بیشتر توان تولید شده توسط پنل‌های خورشیدی تاکنون در شبکه‌های ولتاژ متوسط و ولتاژ ضعیف نصب شده‌اند و هدف آنها تهیه ماکزیمم توان اکتیو تولیدی و ارائه آن به شبکه‌ها می‌باشد [۳].

حضور گسترده پنل‌های فتوولتاییک در طول فیدرهای شبکه‌های توزیع، پتانسیل بروز بعضی چالش‌ها از جمله نوسانات ولتاژ و عکس شدن جهت توان را در سیستم‌های قدرت به وجود می‌آورند [۴،۵]. اپراتورهای سیستم توزیع<sup>۳</sup> نیز، به وجود آمدن چالش افزایش ولتاژ، مخصوصاً در زمان تولید ماکزیمم توان اکتیو پنل فتوولتاییک (زمان ظهر) و در نقاط دورتر از پست‌ها را تایید می‌کنند [۶]. این اضافه





ولتاژ ممکن است منجر به خروج اجباری و جدا شدن پنل‌های فتوولتاییک از شبکه توزیع شود که از لحاظ اقتصادی به صرفه نبوده و گاهی ممکن است باعث مشکلاتی در پایداری ولتاژ شبکه شود. کاستن سطح توان تولیدی اکتیو<sup>۴</sup> پنل‌های خورشیدی، ساده‌ترین روش کنترلی برای جلوگیری از اضافه ولتاژ به وجود آمده توسط اینورتر پنل‌های خورشیدی می‌باشد که البته با سیاست‌های بین‌المللی تولید و استفاده حداکثری از منابع تجدیدپذیر مغایرت دارد. از این رو به منظور فائق آمدن بر مشکل اضافه ولتاژ در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف با نفوذ بالای پنل‌های فتوولتاییک، راه حل‌های مختلفی دیگری وجود دارد که به آنها اشاره می‌شود.

برخی تنظیم کننده‌های ولتاژ (کاهش دهنده‌هایی که در عرف استفاده می‌شوند)، از جمله تپ‌چنجر قابل تنظیم زیر بار<sup>۵</sup>، رگولاتورهای اتوماتیک ولتاژ، خازن‌های سوئیچ شونده و راکتورهای موازی، را می‌توان از این موارد ذکر کرد. هرچند محدودیت‌هایی همچون مساله ی اندازه و تعداد این ادوات، عملکرد گسسته و پایین بودن سطح و قدرت سوئیچینگ این ادوات، باعث کاهش کارایی آنها می‌شود. از جمله گزینه‌های دیگر می‌توان به سیستم‌های ذخیره سازی انرژی اشاره کرد که می‌توانند انرژی مازاد تولیدی در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف با نفوذ بالای پنل‌های فتوولتاییک را، به منظور کاستن از بروز اضافه ولتاژ، ذخیره کنند. هرچند به دلیل هزینه سرمایه‌گذاری بالا، باعث محدودیت در استفاده، در مقیاس‌های بالای اجرای آنها شده است. روش دیگر کنترل توان راکتیو<sup>۶</sup> پنل‌های فتوولتاییک، می‌باشد که به عنوان روشی پرترفدار از آن یاد می‌شود، که محدودیت روش‌های پیشین (روشهای سنتی)، را ندارد. هر چند به کارگیری این روش، وابستگی زیادی با ظرفیت استفاده نشده از اینورتر پنل‌های فتوولتاییک دارد، به عبارت دیگر در زمان‌های تابش نور حداکثری (معمولاً ظهر)، اینورتر با محدودیت توانایی تولید توان راکتیو، و به طبع آن محدودیت در توانایی مهار اضافه ولتاژ به وجود آمده در شبکه توزیع، روبرو خواهد شد، از این رو روش کنترل توان راکتیو ممکن است که همیشه موثر نباشد و در بعضی از مواقع روش کاهش سطح توان اکتیو نیز، جهت نگه داشتن ولتاژ در محدوده مجاز، به آن اضافه شود. روش دیگر ادغام کنترل توان راکتیو و کاستن سطح توان اکتیو می‌باشد که در میان روش‌های موجود، دارای مزیت‌های حائز اهمیتی است. در ادامه مروری بر روی کارکرد روش‌های کنترلی مورد نظر که به آنها اشاره شد، با استفاده از سه استراتژی کنترلی متمرکز، توزیع شده، و محلی، پرداخته شده است. در روش کنترل مرکزی عملکرد بر پایه جمع‌آوری اطلاعات مختلف از کل شبکه توزیع و ارسال به یک واحد مرکزی به منظور اتخاذ دستورات، و بدست آوردن نقاط کاری بهینه صورت می‌گیرد. هرچند که این روش بهینه‌ترین روش می‌باشد، اما به دلیل نیاز به سرمایه‌گذاری بالا جهت تهیه ی بستر ارتباطی وسیع، در عمل محدودیت‌هایی دارد. در میان سه استراتژی کنترلی بیان شده روش محلی، به دلیل اینکه احتیاجی به زیرساخت ارتباطی جهت انتقال اطلاعات ندارد، هزینه اجرای کمتری داشته، و از لحاظ اقتصادی به صرفه تر است. هرچند که دارای بهره‌وری کمتری نسبت به استراتژی‌های کنترلی دیگر می‌باشد، لذا ارتقای بهره‌وری در استراتژی کنترل محلی، از خواسته‌های پژوهش‌های آینده می‌تواند باشد.

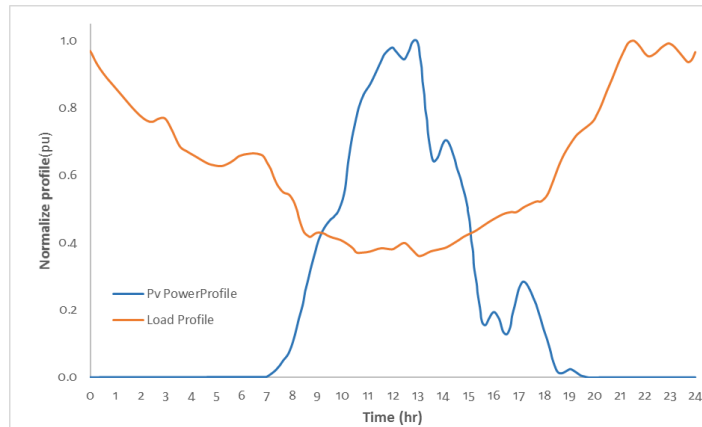
این مقاله ابتدا با بیان علت گسترش انرژی‌های پاک در دنیا مخصوصاً استفاده از پنل فتوولتاییک، در قسمت ۲ پیامدهای این گسترش در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف را مطرح می‌کند، سپس در قسمت ۳ به طور خلاصه مروری بر روی روش‌های تنظیم کننده ی ولتاژ، از جمله روش‌های کنترلی اینورتر پنل‌های فتوولتاییک در این شبکه‌ها و مزایا و معایب هر یک اشاره داشته، و در ادامه به برخی از روش‌های ترکیبی طرفدار به منظور هم پوشانی این روش‌ها از یکدیگر و افزایش بهره‌وری اشاره می‌شود. در انتها به استراتژی‌های مختلف کنترلی مرسوم پنل‌های فتوولتاییک، از جمله محلی، توزیع شده و مرکزی در قسمت ۴ اشاره شده، و روش‌های کنترلی طرفدار به کارگیری اینورتر پنل‌های فتوولتاییک، به طور مفصل در استراتژی محلی توضیح داده شده است.

## ۲- اثرات و پیامدهای حضور گسترده ی پنل‌های فتوولتاییک در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف

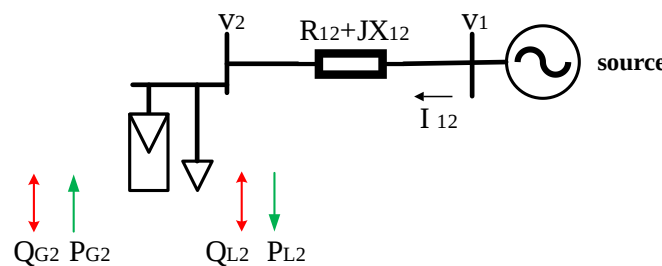
به طور کلی سیستم‌های فتوولتاییک تمایل دارند تا تولید توان اکتیو خود در وسط روز را، در حد ماکزیمم نگه دارند. هرچند در این زمان (ظهر)، مصرف در فیدرهای خانگی معمولاً کمتر از پیک‌های قبل از ظهر و بعد از ظهر می‌باشد، در چنین حالت‌هایی از تولید بالا و تقاضای مصرف محلی پایین، امکان به وجود آمدن عکس شدن جهت توان، افزایش پیدا کرده که منجر به ایجاد اضافه ولتاژ خواهد شد، شکل (۲). از طرفی وضعیت هوا تاثیر بسزایی بر روی موارد اشاره شده دارد. عکس شدن جهت توان و بروز اضافه ولتاژ ناشی از تولید توان پنل‌های فتوولتاییک، رابطه مستقیمی با شدت تابش نور خورشید و دیماند محلی بار (اکتیو و راکتیو) دارد و این موضوع در ظهر روزهایی با هوای صاف، هنگامی که توان تولیدی اکتیو در حالت پیک و دیماند محلی بار معمولاً کم می‌باشد، شدت بیشتری



خواهد داشت. شکل (۳) یک شبکه ساده با دو باس را نشان می‌دهد. باس ۱ به عنوان باس مرجع، و به باس ۲ یک بار و یک پنل فتوولتاییک متصل هستند. معادله افت ولتاژ مابین شین ۱ و ۲ در رابطه (۱) نشان داده شده است، که در آن  $\Delta V_{12}$  همان افت ولتاژ، در صورتی که  $R_{12}$  و  $X_{12}$  به ترتیب مقاومت و راکتانس خط باشند. همچنین  $P_2 = P_{L2} - P_{G2}$  و  $Q_2 = Q_{L2} - Q_{G2}$ ، توان اکتیو و راکتیو خالص، و  $V_2$ ، ولتاژ مربوط به باسبار است.



شکل (۲): نمودار نرمالایز شده‌ی تولید توان پنل فتوولتاییک و پروفیل بار مسکونی، در طی یک روز [۷]



شکل (۳): نمونه ای از ترکیب پنل فتوولتاییک با شبکه توزیع

$$\begin{aligned} \Delta V_{12} &= I_{12}(R_{12} + jX_{12}) = \left( \left( P_2 - jQ_2/V_2 \right) \right) (R_{12} + jX_{12}) \\ &= \left( \frac{P_2 R_{12} + Q_2 X_{12}}{V_2} \right) + \frac{j(P_2 X_{12} - Q_2 R_{12})}{V_2} \end{aligned} \quad (1)$$

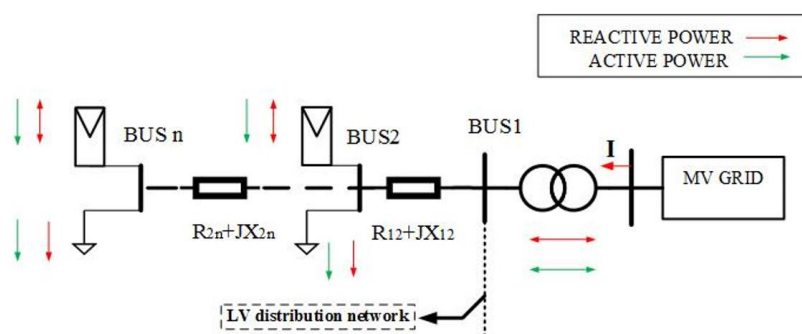
در شبکه‌های فشار قوی، اثر مقاومت خط به دلیل پایین بودن نسبت  $R$  به  $X$  قابل چشم پوشی است در صورتی که در شبکه‌های فشار ضعیف این فرض وجود ندارد. با صرفنظر از قسمت موهومی رابطه (۱) و تقریب،  $\Delta V_{12}$  به دست می‌آید:

$$\Delta V_{12} = \frac{(P_2 R_{12} + Q_2 X_{12})}{V_2} \quad (2)$$

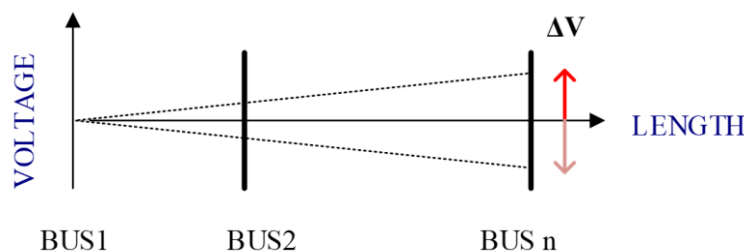


$$d\Delta V_{12} = \frac{R_{12}}{V_2} dP_2 + \frac{X_{12}}{V_2} dQ_2 \quad (3)$$

با توجه به رابطه (۳) مشاهده می‌شود که به دلیل بالا بودن نسبت  $R$  به  $X$  در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف، اندازه‌ی دامنه ولتاژ، حساسیت بیشتری به توان اکتیو تزریقی به شبکه دارد. شکل (۴) یک شبکه‌ی ساده توزیع فشار ضعیف همراه با تولید کننده‌های فتوولتاییک را نشان می‌دهد. شکل (۵) چگونگی افزایش اضافه ولتاژ در طول فیدر را نشان می‌دهد. زمانی که تولید توان اکتیو پنل فتوولتاییک بیشتر از بارهای مصرفی متصل محلی باشد، پس توان اکتیو به شبکه تزریق می‌شود که باعث بروز عکس شدن جهت توان و در نتیجه افزایش ولتاژ در فیدر، مخصوصاً در انتهای آن شود. زمانی که بار مصرفی هر باس، بزرگتر از تولید پنل فتوولتاییک می‌شود جهت توان اکتیو به سمت بار می‌باشد در نتیجه ولتاژ در انتهای فیدر کاهش می‌یابد.



شکل (۴): یک شبکه‌ی ساده توزیع فشار ضعیف همراه با تولید کننده‌های فتوولتاییک



شکل (۵): انحراف ولتاژ با توجه به طول فیدر

### ۳- تجهیزات کنترلی جهت تنظیم ولتاژ

یکی از متغیرهای مهمی که در موضوع کیفیت توان شبکه‌های برق مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، بررسی در محدوده مجاز بودن ولتاژ شبکه می‌باشد. از این رو به منظور جلوگیری از خروج مقدار ولتاژ شبکه از محدوده‌ی مجاز، روش‌های مختلفی وجود دارد، که در این مقاله به برخی از مهم‌ترین آنها از جمله، تجهیزات کنترل ولتاژ سنتی، اینورتر هوشمند پنل‌های خورشیدی، سیستم‌های ذخیره انرژی، خودروهای الکتریکی در حال شارژ (متصل به شبکه)، مدیریت و پاسخ به تقاضا و روش‌های ترکیبی اشاره شده و در ادامه در مورد هر یک توضیح داده خواهد شد.

#### ۳-۱- تجهیزات کنترل ولتاژ سنتی

وسایل کنترل ولتاژی که در عرف، جهت تنظیم ولتاژ نقاط مختلف شبکه استفاده می‌شوند، مانند تپ چنجر قابل تنظیم زیر بار، رگولاتور ولتاژ خط (بوسه‌های شبکه)، بانک‌های خازنی، راکتورهای موازی و ... می‌باشند که البته این تجهیزات دارای قدرت پاسخ دهی





دینامیکی ضعیف بوده و در نتیجه جهت از بین بردن نوسانات ولتاژ لحظه‌ای مناسب نیستند. به عنوان مثال، در زمان‌هایی که جابجایی سریع ابر رخ می‌دهد، سطح تابش نور خورشید می‌تواند به سرعت تغییر کند، که می‌تواند در یک منطقه که در آن حضور گسترده و مشارکت بالایی پنل‌های فتوولتاییک مقیاس کوچک وجود دارد، باعث تغییر ناگهانی سطح توان تولیدی پنل فتوولتاییک شود (جدول (۱))، که با توجه به رابطه (۳)، باعث ایجاد نوسانات ولتاژ در آن منطقه می‌شود. برای چنین شرایطی با توجه به اینکه تجهیزات کنترل ولتاژ سنتی قادر به پاسخ دهی سریع به نوسانات ولتاژ لحظه‌ای به وجود آمده نیستند، کیفیت توان شبکه را تحت تاثیر خود قرار خواهند داد.

جدول (۱): مقدار توان اکتیو تولیدی در شرایط آب و هوایی متفاوت در یک نیروگاه خورشیدی ۱۰ کیلووات (بر حسب پریونیت)

| زمان (ساعت) | توان تولیدی (پریونیت) |            |            |
|-------------|-----------------------|------------|------------|
| تاریخ       | ۲۰۲۲/۰۵/۱۷            | ۲۰۲۲/۰۵/۱۲ | ۲۰۲۲/۰۴/۱۵ |
| ۷:۰۰        | ۰,۰۳                  | ۰,۰۳۹      | ۰,۰۴۵      |
| ۸:۰۰        | ۰,۰۶                  | ۰,۱۶۲      | ۰,۲۲       |
| ۹:۰۰        | ۰,۰۸۶                 | ۰,۳        | ۰,۴۷۳      |
| ۱۰:۰۰       | ۰,۰۳۶                 | ۰,۰۴۳      | ۰,۶۳۱      |
| ۱۱:۰۰       | ۰,۱۴۷                 | ۰,۶۷۶      | ۰,۷۴۵      |
| ۱۲:۰۰       | ۰,۴۷۳                 | ۰,۷۲۸      | ۰,۷۵۱      |
| ۱۳:۰۰       | ۰,۵۱۱                 | ۰,۲۰۴      | ۰,۷۴۸      |
| ۱۴:۰۰       | ۰,۶۰۱                 | ۰,۵۷۷      | ۰,۷۰۱      |
| ۱۵:۰۰       | ۰,۵۹۸                 | ۰,۶۱۲      | ۰,۶        |
| ۱۶:۰۰       | ۰,۰۴۵                 | ۰,۳۲۸      | ۰,۴۲۵      |
| ۱۷:۰۰       | ۰,۲۵۱                 | ۰,۱۸۲      | ۰,۲۲       |
| ۱۸:۰۰       | ۰,۰۴۷                 | ۰,۰۴       | ۰,۰۳       |
| ۱۸:۴۰       | ۰                     | ۰          | ۰          |
| ۱۹:۰۰       | ۰,۰۳                  | ۰,۰۳۹      | ۰,۰۴۵      |

تعداد سوئیچ‌های عملیاتی تپ پنجر ترانسفورماتور محدود است، همچنین تغییر تب‌های تنظیمی آن ممکن است باعث بروز حالت‌های گذرای ناخواسته و یا ایجاد انحرافات ناگهانی ولتاژ در نقاطی از شبکه گردد [۸]، که برای مصرف‌کنندگان مهم می‌باشد، بنابراین تپ چنجرها برای کاستن اضافه ولتاژهای که ناگهانی و سریع به وجود می‌آیند، مناسب نیستند. اپراتورهای شبکه توزیع می‌توانند به منظور تنظیم ولتاژ بهتر، بانک‌های خازنی و یا راکتورهای موجود در پست‌ها را فعال کند [۹]. اکثر این ادوات عملکردی دستی و ساده داشته و از لحاظ اقتصادی ارزان قیمت هستند [۱۰، ۱۱]، ولی برای کاستن نوسانات ولتاژ مناسب نیستند. البته نمونه‌های پیشرفته بانک‌های خازنی با قابلیت‌های کنترل از راه دور هم وجود دارند، ولی قیمت زیادی داشته و همچنین قابلیت عملکرد و بهره‌برداری توسط فرمان اپراتورهای سیستم توزیع را ندارند [۱۲]. امروزه جایگزینی ادوات جدید و هوشمند با نمونه‌های سنتی ذکر شده، جهت فائق آمدن بر مشکلات آنها پیشنهاد می‌شود. در [۱۳] یک روش کنترل هماهنگ شده دو سطحی برای تپ چنجر قابل تنظیم زیر بار را به منظور مدیریت اضافه ولتاژ نشان داده می‌شود.

### ۳-۲- پنل فتوولتاییک (همراه با اینورتر هوشمند)

در شبکه‌های توزیع، اپراتورهای سیستم توزیع، مسئولیت نگه داشتن ولتاژ در رنج قابل قبول را دارند، که البته لازمه آن فراهم کردن یک بستر ارتباطی دو طرفه بین تولید کنندگان انرژی و اپراتورها، به منظور اندازه‌گیری مشخصه‌های الکتریکی خروجی واحدهای تولید و هم چنین در صورت لزوم، اعمال فرامین کنترلی روی آنها می‌باشد. هرچه این بستر ارتباطی از سطح بالاتری برخوردار باشد (که مستلزم هزینه‌های بالاتری است)، برنامه ریزی تولید و مصرف و مدیریت کیفیت توان شبکه، با تعامل بهتری بین اپراتور سیستم توزیع و واحدهای تولید انرژی انجام خواهد شد [۱۴]. استفاده از اینورتر پنل‌های فتوولتاییک برای کنترل ولتاژ، یک روش پیشرفته به حساب می‌آید که معمولاً به یک شبکه ارتباطی دو طرفه بین اینورتر پنل‌ها و مرکز کنترل و سیستم‌های اندازه‌گیری جهت مانیتورینگ بدون





وقفه شبکه نیاز دارد. اینورتر پنل فتوولتاییک که توان مستقیم تولیدی را به متناوب تبدیل کرده و به شبکه تزریق می کند، می تواند توسط روش های کنترلی مختلف از جمله الگوریتم ماکزیمم توان اکتیو خروجی<sup>۷</sup>، کنترل توان اکتیو/ولتاژ، و روش کنترل توان اکتیو/راکتیو عملکرد داشته باشد. از جمله این کاربردها می توان به کنترل توان معکوس و کنترل شیب توان در رابطه با دست یابی به پشتیبانی از ولتاژ شبکه اشاره کرد [۱۸-۱۵].

### ۳-۲-۱- کنترل توان راکتیو

با قابلیت کنترل توان راکتیو اینورترهای امروزی سیستم های فتوولتاییک قادر به تنظیم ولتاژ در شبکه های توزیع می باشد [۲۲-۱۹]. یک استراتژی کنترل توان راکتیو علاوه بر کنترل محلی می تواند با روش های کنترل توزیع شده و مرکزی نیز پیاده سازی شود. به دلایل اقتصادی و با هدف جلوگیری از کمتر کردن سطح توان اکتیو تولیدی پنل های فتوولتاییک، استفاده از روش کنترل توان راکتیو، ترجیح داده می شود. به همین دلیل سعی می شود تا حد امکان قبل از فعال سازی روش کاستن توان اکتیو، روش کنترل توان راکتیو بتواند اضافه ولتاژ ایجاد شده در شبکه را کنترل و کاهش دهد. به عنوان مثال در حالت استراتژی محلی، جهت جلوگیری از اضافه ولتاژ می بایست کمترین مقدار ممکن از قابلیت توان راکتیو به کارگیری شود، تا ظرفیت خالی بیشتری از توان راکتیو، جهت شرایط بدتر اضافه ولتاژ احتمالی داشته باشیم. هم چنین به منظور جلوگیری از فعال سازی غیر ضروری کاستن توان اکتیو، ظرفیت خالی توان راکتیو کلیه پنل های فتوولتاییک می بایست قبل از رسیدن ولتاژ به مقدار آستانه ی کاستن توان اکتیو، به کارگیری شود. با بررسی های صورت گرفته مشخص می شود که روش کنترل توان راکتیو محلی، در مواردی با دیماندا بالا، به تنهایی قادر به مهار اضافه ولتاژ در شبکه نمی باشد، که در این موارد بایستی از روش های متمرکز و یا توزیع شده استفاده شود. فعال سازی روش کنترل توان راکتیو اینورتر پنل زمانی انجام می شود که ولتاژ ترمینال آن به مقدار آستانه ی کنترل توان راکتیو برسد. با توجه به اولویت دار بودن کنترل توان راکتیو نسبت به کاستن توان اکتیو، مقدار ولتاژ آستانه ی کنترل توان راکتیو می بایست کمتر از ولتاژ آستانه ی کاستن توان اکتیو باشد. به جهت عملکرد بهینه ی در فعال سازی فانکشن های کنترلی مورد نظر در اینورتر پنل، انتخاب این دو مقدار از ولتاژ بایستی با در نظر گرفتن یک مصالحه ای انجام شود. اخیرا روش های نوینی همچون استفاده از هوش مصنوعی، توانسته اند در عملکرد بهینه ی اینورتر پنل ها، به منظور حفظ ولتاژ شبکه در رنج قابل قبول، مشارکت داشته باشند. در [۲۳] در جهت حفظ ولتاژ شبکه توزیع در رنج قابل قبول، از شبکه عصبی مصنوعی به منظور پیش بینی مقادیر توان راکتیو بهینه توزیع شده توسط اینورتر پنل ها، که از طریق یادگیری تقریبی ورودی، خروجی حاصل از پخش بار بهینه ی متناوب بدست می آورد، هم در استراتژی محلی و هم مرکزی، استفاده می شود. نتایج نشان می دهند که روش پیشنهادی علاوه بر حفظ ولتاژ شبکه در رنج قابل قبول، باعث ذخیره انرژی ۴۴ درصدی نسبت به روش کنترل ضریب قدرت ثابت می گردد.

یکی از روش هایی که می تواند در مواجهه با عدم قطعیت هایی همچون تغییر سطح توان تولیدی پنل های فتوولتاییک، ناشی از بروز شرایط آب و هوایی مختلف (هوای ابری و یا کاملاً آفتابی)، و یا تغییر سطح بار مصرفی متصل به شبکه، در حفظ پایداری و کاهش نوسانات ولتاژی در شبکه به ما کمک کند، بهره گیری از الگوریتم های فرا ابتکاری و هوش مصنوعی می باشد [۲۴]. هم چنین در مناطق جغرافیایی با اقلیم های مختلف، شدت تابش نور خورشید، زاویه ی تابش و همچنین تعداد روزهای آفتابی در سال، متفاوت خواهد بود که طبیعتاً در مقدار توان تولیدی پنل های آنها تاثیر خواهد گذاشت. لذا به منظور کم تر کردن این اثرات که بر روی سطح توان تولیدی شبکه تاثیر می گذارد، بایستی مواردی از این قبیل در زمان نصب سیستم های خورشیدی در نظر گرفته شوند. علاوه بر این می توان به منظور کم تر کردن اثر سطوح مختلف تولید توان سیستم های فتوولتاییک که در شرایط مختلف جغرافیایی ممکن است به وجود آید، از سیستم های تولید توان دیگر نیز (همانند توربین های آبی، بادی، دیزل ژنراتورها و...) به صورت ترکیبی کمک گرفت. توان راکتیو می تواند باعث افزایش و یا کاهش ولتاژ شبکه گردد، در حالت خازنی (تزریق توان راکتیو) ولتاژ شبکه افزایش می یابد و در حالت سلفی (جذب توان راکتیو) ولتاژ شبکه کاهش می یابد.



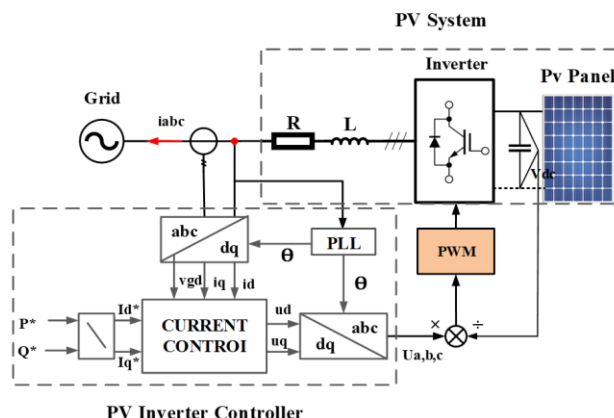


### ۳-۲-۲- کاستن توان اکتیو

در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف به دلیل بالا بودن نسبت  $R$  به  $X$ ، کنترل توان راکتیو اثرگذاری و حساسیت کمتری بر روی ولتاژ شبکه دارد. لذا به همین دلیل اخیراً تنظیم مقدار توان تولیدی اکتیو پنل فتوولتائیک در رابطه با ساپورت تنظیم ولتاژ، مشارکت داشته است. هر چند از نظر کنترلی کاستن تدریجی توان تولیدی اکتیو توسط اینورتر پنل، به منظور جلوگیری از جدا شدن کامل پنل فتوولتائیک در مواقع بروز اضافه ولتاژ شبکه انجام می‌گیرد. این عمل سطح بالاتر از مشارکت پنل‌ها در تولید توان اکتیو را، در مقایسه با جداسازی کامل آنها از شبکه، به همراه خواهد داشت. به عنوان مثال فعال سازی روش کاستن توان اکتیو اینورتر پنل در حالت استراتژی محلی، زمانی اتفاق می‌افتد که ولتاژ اندازه‌گیری شده در محل اتصال ترمینال آن، به مقدار ولتاژ آستانه‌ی کاستن توان اکتیو برسد. همچنین روش کاستن توان اکتیو می‌تواند به صورت روش کنترلی توزیع شده اجرا شود، که در آن ترکیبی از استراتژی‌های کنترل توان راکتیو و کاستن توان اکتیو تولیدی، به طور بهینه‌ای از طریق استفاده از روش کنترلی توزیع شده انجام شده است [۲۵، ۲۶]. همچنین الگوریتم و استراتژی خاص به عنوان پشتیبان می‌تواند به منظور بهبود عملکرد کنترل مرکزی پیشنهاد شده، (شامل دو ضریب برای شتاب همگرایی، یکی کنترل توان راکتیو و دیگری کاستن توان اکتیو تولیدی) به کنترلر محلی اضافه شود، و باعث بهبود ۹۷.۳ درصد ضریب همگرایی و کیفیت ولتاژ می‌شود [۲۷]. یک روش کاستن توان تولیدی اکتیو، بر پایه افتی<sup>۸</sup> با تقسیم مساوی تلفات توان خروجی، به منظور مدیریت مشکل اضافه ولتاژ پیشنهاد می‌شود [۲۸]. علاوه بر این یک روش هماهنگ شده جهت مهار اضافه ولتاژ در شبکه توزیع، با حداقل سازی استفاده از روش کاستن توان اکتیو، در [۲۹] طراحی شده است. هر چند که تاثیر استراتژی کاستن توان اکتیو بیشتر از اثر کنترل توان راکتیو روی کاستن اضافه ولتاژ به وجود آمده در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف می‌باشد، اما ممکن است که در بازدهی پنل‌های فتوولتائیک اثر کاهشی داشته باشد. بنابراین یک سیاست دارای بازدهی الکتریکی در این مورد این است که پنل‌های فتوولتائیک را به سهم بودن در مهار اضافه ولتاژ به وجود آمده در شبکه تشویق کنند، (هر کدام به نوبه خود قسمتی از اضافه ولتاژ به وجود آمده را مهار کنند). حتی اگر در لحظاتی از طول روز و هنگام بروز اضافه ولتاژ در شبکه، مجبور به کاهش سطح توان اکتیو تزریقی به شبکه باشند. مدیریت توان اکتیو تولیدی پنل‌های فتوولتائیک، می‌تواند جهت پشتیبانی از تنظیم ولتاژ در شبکه‌های فشار ضعیف توزیع استفاده گردد، همچنین در [۳۰]، تکنیک‌های هماهنگی بین پنل‌های به کار گرفته شده با توانایی فائق آمدن بر نوسانات ولتاژ، با در نظر گرفتن تلفات مینیمم شبکه، ارائه شده است. اگر چه کم کردن سطح توان تولیدی اکتیو تحویلی فتوولتائیک به شبکه می‌تواند در راستای کاستن اضافه ولتاژ مفید باشد، ولی از لحاظ اقتصادی به دلیل کاستن بازدهی تولید پنل به صرفه نمی‌باشد.

اینورتر پنل‌های فتوولتائیک موجود در شبکه‌های توزیع به دلیل ظرفیت کوچکیشان، اکثراً در مد کنترلی اکتیو/راکتیو، عملکرد دارند، شکل (۶). اینورتر پنل فتوولتائیک که فرایند کنترل را انجام می‌دهد، بر اساس مدولاسیون عرض پالس<sup>۹</sup> عمل کرده، که در این روش، جریان‌های رفرنس را از توان اکتیو و راکتیو مرجع بدست آورده، و معادل آن را در صفحه ی مختصات  $dq$  بدست آورد. همچنین ولتاژ و جریان ترمینال سیستم فتوولتائیک، در محل اتصال به شبکه اندازه‌گیری می‌شود. با مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر مرجع، و در نظر گرفتن زاویه‌ی  $\theta$  مناسب، تلاش کنترلی مناسب جهت اعمال توان اکتیو و راکتیو مد نظر به شبکه‌ی برق، اتخاذ می‌گردد. در این روش، توان اکتیو و راکتیو مرجع می‌تواند توسط یکی از منابع شامل، سیستم مدیریت انرژی خانگی، مرکز کنترل شبکه‌ی توزیع و .... تهیه شود. توانایی تنظیم ولتاژ توسط پنل‌های فتوولتائیک، به منبع تهیه کننده‌ی رفرنس‌های  $P, Q$  و زیرساخت ارتباطی استفاده شده بین آنها بستگی دارد.

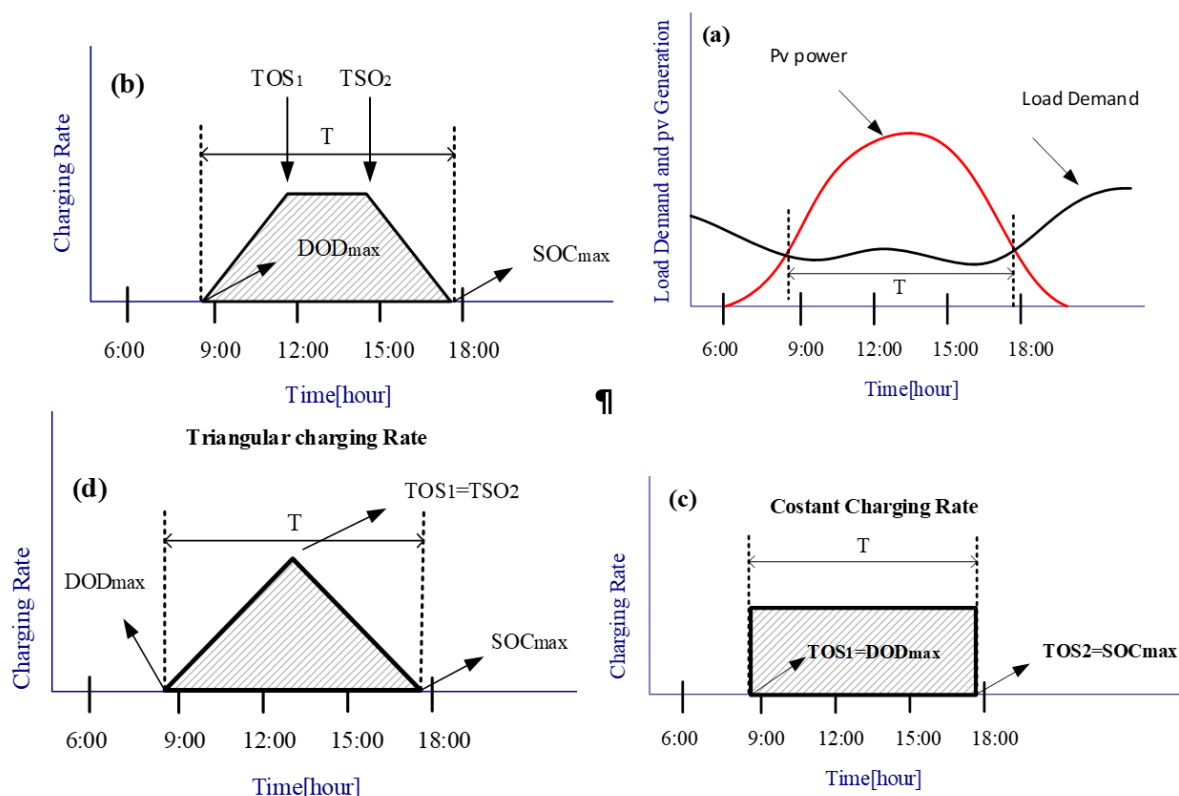




شکل (۶): شماتیک دیگرام روش کنترلی (P, Q) مربوط به اینورتر پنل فتوولتاییک

### ۳-۳- سیستم‌های ذخیره انرژی

همانطور که در رابطه (۳) دیده شد توان اکتیو در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف حساسیت بیشتری به دامنه ولتاژ دارد، به همین خاطر کنترل توان اکتیو روشی موثرتر در مقایسه با کنترل توان راکتیو خواهد بود. اخیراً با گسترش و پیشرفت سریع ادوات ذخیره‌ساز انرژی و کاهش پیوسته قیمت ساخت این ادوات، به کارگیری آنها جهت ساپورت ولتاژ شبکه از لحاظ اقتصادی منطقی‌تر شده است. دو استراتژی اصلی برای استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی وجود دارد، که می‌توان به باتری‌های توزیع شده و بانک باتری مرکزی اشاره کرد. استراتژی اول استراتژی توزیع شده است که عملکرد آن وابسته به سیستم ذخیره انرژی به کار برده شده در هر سیستم فتوولتاییک می‌باشد.



شکل (۷): استراتژی‌های مختلف شارژ/دشارژ، a: پروفایل بار و تولید توان پنل فتوولتاییک. b: پروفایل شارژ/دشارژ دوزنقه ای c: پروفایل شارژ با نرخ ثابت. d: پروفایل شارژ مثلثی





کنترل سیستم‌های ذخیره انرژی توزیع شده ی سنتی زمانی فعال می‌شد که تولید توان اکتیو پنلی که به آن متصل بود ، بیشتر از بار متصل به آن باشد. در زمان ظهر سیستم به طور کامل شارژ می‌شد و بروز اضافه ولتاژ جلوگیری می‌کرد. علاوه بر استراتژی شارژ و دشارژ سنتی ، استراتژی‌های مختلفی دیگری نیز وجود دارد، از جمله دوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی که در شکل (۷) نشان داده شده است، که در آن:

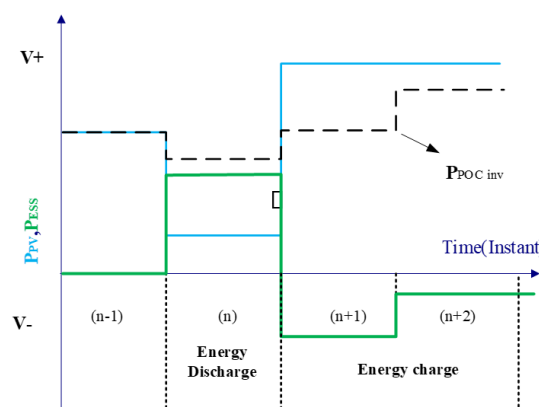
$DOD_{max}$  : زمانی که وضعیت شارژ  $10^\circ$  در حداقل مقدار خود قرار دارد

$SOC_{max}$  : زمانی که مقدار وضعیت شارژ حداکثر می‌باشد

$TOS_1$ : زمان تغییر نرخ شارژ از صعودی به ثابت       $TOS_2$ : زمان تغییر نرخ شارژ از ثابت به نزولی

باتری‌های نصب شده در انتهای فیدرها تاثیر بیشتری در بهبود پروفایل ولتاژ، نسبت به باتری‌هایی دارند که در ابتدای خط نصب می‌شوند. استراتژی دوم به کار بردن سیستم‌های ذخیره انرژی، روش مرکزی می‌باشد که نیاز به تعیین موقعیت بهینه جهت نصب در شبکه توزیع، و همچنین تعیین سائز بانک باتری استفاده شده را دارد. بهترین موقعیت نصب بانک باتری در این روش، در انتهای فیدر و در دورترین نقطه از پست توزیع می‌باشد. استفاده از باتری در کنار کنترل توان اکتیو درپنل‌ها، توانایی بیشتری در پشتیبانی ولتاژ شبکه نسبت به استفاده از باتری در کنار کنترل توان راکتیو پنل فتوولتائیک (به دلیل محدودیت ظرفیت توان راکتیو در زمان پیک تولید پنل) خواهد داشت.

با اضافه شدن سیستم‌های ذخیره انرژی، کاستن توان اکتیو می‌تواند در این سیستم‌ها ذخیره شده و آزادی عمل در پشتیبانی ولتاژ شبکه را افزایش دهند. به دلیل توسعه سریع تکنولوژی ساخت سیستم‌های ذخیره انرژی، هزینه تهیه آنها در حال کاهش یافتن بوده و استفاده از روش‌های هماهنگ بین پنل‌ها و سیستم‌های ذخیره انرژی به طور قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با استفاده از روش کاستن توان اکتیو پیشی خواهد گرفت، [۳۱]. علاوه بر این سیستم‌های ذخیره انرژی توانایی مهار و اصلاح پیک توان اکتیو تولیدی را داشته و می‌توانند به صورت پشتیبان عملکرد داشته باشند [۳۲-۳۴]. یک روش پیشنهادی جهت هماهنگ کردن اینورتر پنل‌ها با سیستم‌های ذخیره انرژی، در استراتژی کنترل مرکزی، به منظور کاستن اضافه ولتاژ شبکه، در [۳۵، ۳۶] اشاره شده است. اگرچه که مسئله مهار اضافه ولتاژ با راندمان بالا از طریق استفاده از روش‌های کنترل مرکزی حل می‌شود، اما جهت قابلیت اطمینان آن، نیاز به زیرساخت ارتباطی سریع و پرهزینه می‌باشد. در [۳۷]، یک روش کنترلی هماهنگ شده برای سیستم‌های ذخیره انرژی پیشنهاد شده که در این روش ترکیبی از روش کنترلی توزیع شده و محلی وجود دارد که یک الگوریتم کلی و جامع برای نگه داشتن ولتاژ در حد نرمال برای لایه کنترل توزیع شده و یک کنترل منطقی برای کنترل محلی به منظور مدیریت وضعیت شارژ اتخاذ شده است.



شکل (۸): نمایش روش کنترلی نرخ/شیب [۳۸]

شکل (۸)، یک روش کنترلی بر اساس کنترل نرخ/شیب <sup>۱۱</sup> را برای سیستم ذخیره انرژی توزیع شده، به منظور کاستن اضافه ولتاژهای ناگهانی به وجود آمده در خروجی پنل‌های موجود در شبکه توزیع فشار ضعیف پیشنهاد داده است. سیستم‌های ذخیره انرژی علاوه بر کنترل پیک توان اکتیو می‌توانند در کاربردهایی همچون پشتیبانی توان اکتیو، ثابت کردن نوسانات خروجی پنل‌های فتوولتائیک مورد

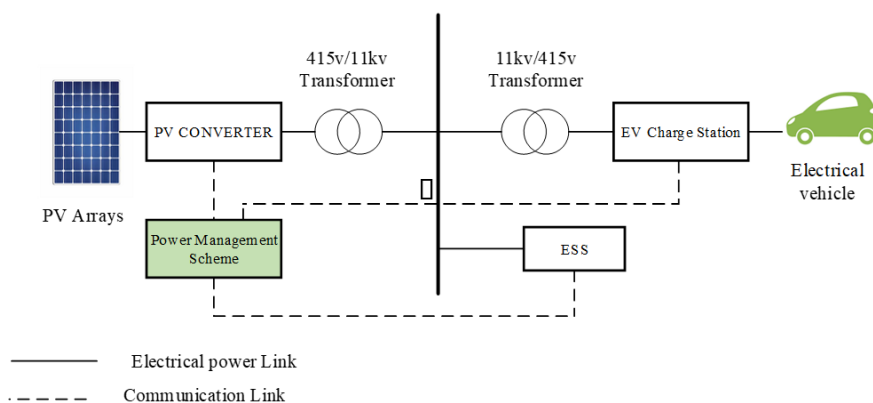




استفاده قرار گیرند [۳۹-۴۱]. با استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی، ظرفیت مصرف توان توسط خود مالکین پنل‌ها، به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که در راستای کاهش اضافه ولتاژ در شبکه‌هایی با مشارکت بالای پنل‌های فتوولتاییک مفید خواهد بود [۴۲]. هماهنگی کنترلی بین اینورتر پنل‌ها و سیستم‌های ذخیره انرژی به نحوی باید باشد تا علاوه بر استفاده‌ی حداکثری از توان سیستم‌های خورشیدی و حداقل کردن توان شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره انرژی، بتوان به شرط در رنج قابل قبول ماندن ولتاژ شبکه‌ی توزیع مورد نظر دست یافت. هم چنین در صورت اضافه کردن باتری‌های مجهز به اینورتر مستقل به شبکه، می‌توان به درجه‌ی آزادی بیشتری در رسیدن به اهداف ذکر شده دست یافت [۴۸-۴۳].

### ۳-۴- خودروهای برقی متصل به شبکه (در حال شارژ)

به دلیل افزایش تقاضای انرژی امن و بهبود بخشیدن وضعیت هوا، کاهش آلودگی صوتی و حذف گازهای گلخانه‌ای، برخی از کشورها، استفاده و به کارگیری از خودروهای برقی را در دست کار قرار داده‌اند [۴۹،۵۰]. قابلیت بازگرداندن توان از جایگاه‌های شارژ خودرو برقی به شبکه برق<sup>۱۲</sup>، با عبارت (V2G) نشان داده می‌شود [۵۱،۵۲]. وسایل نقلیه الکتریکی در زمان‌هایی که استفاده نمی‌شوند می‌توانند به طور کمکی به شبکه توزیع سرویس داده و باعث تنظیم ولتاژ و فرکانس شبکه گردند. ایستگاه‌های شارژ وسایل نقلیه الکتریکی نیز، این توانایی را دارند تا در یک برنامه پاسخ دهی به مصرف، مشارکت کرده و با تغییر عمل شارژ/ دشارژ باتری‌ها، بر اساس سیگنال تنظیم توان از واحد اپراتور سیستم توزیع، در تنظیم ولتاژ موثر واقع شوند، شکل (۹). به منظور استفاده از توانایی عملکردی این روش، زیرساخت‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات مورد نیاز می‌باشد. همچنین استفاده از خودروهای الکتریکی، به منظور مشارکت در تامین توان شبکه به دلیل استفاده از سطح بالای تکنولوژی و استفاده از تعداد زیادی از قطعات به منظور کنترل، از پیچیدگی خاصی برخوردار می‌باشد. قابلیت مورد نظر در وسایل نقلیه الکتریکی کنونی که در دسترس هستند به طور وسیع دیده نشده است که این امر می‌تواند باعث وخیم‌تر شدن کیفیت توان شبکه و ایجاد مواردی همچون آنبالانسی ولتاژ یا افت ولتاژ گردد [۵۳]. این مسائل زمانی بدتر خواهد شد که هیچ مشوقی و یا هیچ برنامه زمان بندی بهینه‌ای جهت شارژ باتری، برای مالکین وسایل نقلیه الکتریکی، وجود نداشته باشد [۵۴]. هرچند اگر بتوان وسایل نقلیه الکتریکی را از طریق ارسال سیگنال به صورت هر ۵ دقیقه یکبار، از قیمت به روز فروش برق شارژشان، مدیریت کرد، می‌توانند باعث افزایش مشارکت پنل‌های فتوولتاییک در شبکه‌های توزیع شوند [۵۵].



شکل (۹): شبکه‌ی توزیع فشار ضعیف همراه با سیستم ذخیره انرژی و خودروهای الکتریکی متصل به شارژ





جدول (۲): مزایا و معایب تجهیزات کنترلی تنظیم کننده ی ولتاژ شبکه

| مزایا                                                                   | معایب                                                                              | تجهیزات کنترلی              |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| - اجرای آسان                                                            | - سرعت پاسخ دهی پایین<br>- هزینه ی نگهداری بالا<br>- ایجاد حالت های گذرای ناخواسته | تپ چنجر قابل تنظیم زیر بار  |
| - اجرا و عملکرد آسان                                                    | - سرعت پاسخ دهی پایین<br>- هزینه ی نصب اضافی                                       | تنظیم کننده ولتاژ           |
| - اجرای آسان<br>- تزریق توان راکتیو                                     | - سرعت پاسخ دهی پایین<br>- هزینه ی نصب اضافی                                       | بانک خازنی                  |
| - تزریق توان اکتیو<br>- تزریق و جذب توان راکتیو                         | - کاهش بهره<br>- استراتژی کنترلی پیچیده                                            | اینورتر پنل فتوولتائیک      |
| - مدیریت توان اکتیو(شارژ و دشارژ)<br>- بر طرف کننده ی نوسانات خروجی پنل | - هزینه ی نصب اضافی<br>- استراتژی کنترلی پیچیده                                    | سیستم ذخیره ی انرژی         |
| - مدیریت توان اکتیو(شارژ و دشارژ)                                       | - طول عمر باتری در خودرو الکتریکی<br>- نیاز به سیاست پیچیده تشویقی                 | خودروی الکتریکی در حال شارژ |
| - حداکثر استفاده از ظرفیت شبکه                                          | - استراتژی کنترلی پیچیده                                                           | مدیریت دیماند               |

### ۳-۵- مدیریت و پاسخ به تقاضا

در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف یکی از ظرفیت‌های مدیریت پاسخ‌دهی تقاضای مصرف، به کارگیری و مدیریت بارهایی مانند وسایل نقلیه الکتریکی و پمپ‌های گرمایی<sup>۱۳</sup> می‌باشد که دارای مشخصه‌های انعطاف‌پذیری هستند [۵۹-۵۶]. سیستم‌های گرمایشی و تهویه هوا معمولاً از هیت پمپ‌ها، به منظور ایجاد گرما و یا سرما در محوطه‌ها استفاده می‌کنند. به دلیل اینرسی بالای حرارت، هیت پمپ‌ها با عملکردی متناوب به منظور نگه داشتن دمای داخل محوطه در رنج مطلوب کنترل می‌شوند. هیت پمپ‌ها نیز می‌توانند با در نظر گرفتن ظرفیت گرمایی به وجود آمده در محوطه‌های تحت کنترل دمایی خود، توان را کنترل و مدیریت کنند. همچنین ظرفیت حرارتی ذخیره شده سیستم‌های تهویه خانگی، می‌تواند مانند یک بار کنترل یافته به کاستن اضافه ولتاژ به وجود آمده کمک کند که در [۶۰]، در مورد آن بحث شده است. در ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف کنترل ولتاژ در شبکه‌های توزیع با نفوذ بالای پنل‌های فتوولتائیک، می‌بایست معیارهایی همچون هزینه ی اجرا و نگهداری، پیچیدگی سیستم کنترلی، سرعت پاسخگویی و مقدار ایجاد بهره وری مورد بررسی قرار گیرند، که به طور خلاصه در جدول (۲) به آن اشاره شده است.

### ۳-۶- روش‌های ترکیبی (هیبرید)

به منظور افزایش بازدهی و تاثیرگذاری استراتژی‌های کاستن اضافه ولتاژ، می‌توان آنها را به صورت ترکیبی استفاده کرد، که در این بخش به نمونه‌هایی از استفاده ترکیبی آنها اشاره می‌شود.

#### ۳-۶-۱- ترکیب روش کنترلی کنترل توان راکتیو/ کاستن توان اکتیو

ایده اصلی در این روش این است که زمانی که نوسانات لحظه‌ای توان اکتیو در پنل فتوولتائیک وجود دارد، جهت مهار اضافه ولتاژهای احتمالی، اولویت با کنترل توان راکتیو باشد تا کنترل توان اکتیو. عملکرد کلی روش‌های کنترل توان راکتیو و کاستن توان اکتیو در بخش‌های قبل توضیح داده شد. در این قسمت‌ها فرض بر این بود که یا استراتژی کنترل توان راکتیو فعال است و یا کاستن توان اکتیو، و در یک لحظه هر دوی آنها با هم فعال نبودند. این قسمت نشان می‌دهد که چگونه روش‌های مذکور بایستی با هم هماهنگ شوند، تا هر دو با هم فعال شوند.

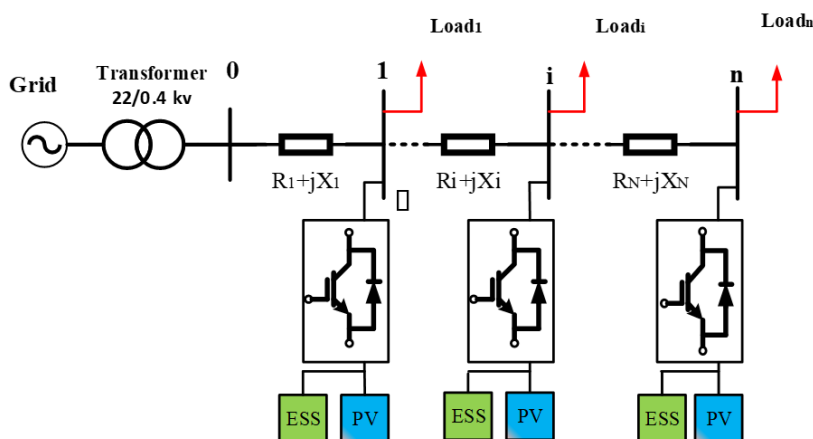




در اینجا نیز تا آنجا که ممکن است از فعال شدن کاستن توان اکتیو خودداری می‌شود و به منظور جلوگیری از تداخل بین روش‌ها، یک اولویت بندی اتخاذ می‌شود که ابتدا روش کنترل توان راکتیو استفاده شده و در شرایط اضافه ولتاژ، روش کاستن توان اکتیو اتخاذ شود. در این الگو دو ولتاژ آستانه کنترل توان راکتیو و کاستن توان اکتیو در نظر گرفته می‌شود، در گام اول با تجاوز ولتاژ از مقدار آستانه‌ای کنترل توان راکتیو، استراتژی کنترل توان راکتیو فعال می‌شود که در این حالت روش کاستن توان اکتیو فعال نیست. در این گام فقط کنترل توان راکتیو از بروز اضافه ولتاژ جلوگیری کرده و تا جایی که ظرفیت توان راکتیو اجازه دهد در مهار اضافه ولتاژ موفق خواهد بود. در مواقعی که ظرفیت توان اکتیو ناکافی بوده و سطح ولتاژ به بالای مقدار آستانه‌ای کاستن توان اکتیو برسد، در گام دوم استراتژی کاستن توان اکتیو وارد مدار می‌شود. بهترین حالت از ترکیب استراتژی‌های کنترلی کاستن توان اکتیو و کنترل توان راکتیو که قابلیت دسترسی در هر زمان را داراست، پیشنهاد شده است که به وسیله آن از مزیت‌های هر دو روش کنترل توان راکتیو و کاستن توان اکتیو، بدون نیاز به ساختار ارتباطی پیچیده بهره برده است. ترکیبی از استراتژی‌های کنترل توان اکتیو و کاستن توان اکتیو در رابطه با پاسخ به تغییرات سطوح ولتاژ محلی، در [۶۱] پیشنهاد شده است، که یک طراحی قوی به منظور به روز رسانی ضرایب اکتیو، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در پیش‌بینی متغیرهای غیر قابل کنترل (از جمله بارها و تولید توان اکتیو) پیشنهاد شده است. در [۶۲] مقدار توان راکتیو تولیدی، از طریق مقدار توان اکتیو تزریقی پل فتوولتایک به شبکه محاسبه می‌شود، که ولتاژ به صورت کنترل محلی و مستقیم، در رنج قابل قبول مدیریت می‌شود.

### ۳-۶-۲- کنترل توان راکتیو به همراه استفاده از سیستم ذخیره انرژی

سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی می‌توانند در سمت جریان مستقیم به سیستم فتوولتایک متصل شده و به مشارکت در ساپورت ولتاژ در شبکه توزیع فشار ضعیف کمک کنند، شکل (۱۰). هر سه استراتژی کنترلی محلی، توزیع شده و مرکزی، می‌توانند در روش کنترل اینورتر پل‌ها، با حضور و مشارکت سیستم‌های ذخیره انرژی کاربرد داشته باشند.



شکل (۱۰): شبکه شعاعی توزیع فشار ضعیف، به همراه واحدهای فتوولتایک و ذخیره انرژی

سیستم‌های ذخیره انرژی، می‌توانند به منظور کاستن اضافه ولتاژ، با قابلیت کنترل توان راکتیو اینورتر پل‌ها ترکیب شده و به کوچک‌تر کردن سایز سیستم‌های ذخیره انرژی مورد نیاز کمک کنند. سیستم ذخیره‌سازی انرژی توزیع شده که به همراه اینورترهای پل‌هایی که در حالت ضریب قدرت فیکس شده بهره‌برداری می‌شوند، دارای بازدهی بیشتری نسبت به بانک‌های باتری سیستم‌های ذخیره انرژی مرکزی که در انتهای فیدر نصب می‌شوند بوده، و به سایز کوچکتری از باتری مورد نیاز، احتیاج دارند [۶۳]. روش دیگری که جهت کاستن سایز سیستم‌های ذخیره انرژی توزیع شده مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از ضریب اکتیو متغیر<sup>۱۴</sup> با توجه به موقعیت سیستم‌های ذخیره انرژی به جای استفاده از ضریب اکتیو ثابت می‌باشد. همچنین به کار بردن ست‌پوینت‌های متغیر کنترل سیستم‌های ذخیره انرژی، باعث کوچک‌تر کردن سایز ذخیره‌ساز مورد نیاز در مقایسه با کنترل ثابت توان آنها می‌شود. استفاده از روش ضریب قدرت/توان اکتیو، به همراه ذخیره‌ساز، بیشترین بازدهی را در حالت حضور کم پل‌های فتوولتایک در شبکه توزیع، داشته و روش کنترل توان راکتیو همراه استفاده از ذخیره‌ساز انرژی، بهترین بازدهی را در حالت حضور گسترده پل‌ها در شبکه توزیع ایفا می‌کند





[۶۴]. استفاده از باتری در کنار کنترل توان اکتیو در پل‌های فتوولتاییک، اثر بیشتری در پشتیبانی ولتاژ شبکه نسبت به استفاده از باتری در کنار کنترل توان راکتیو پل خواهد داشت. سه استراتژی مختلف کنترلی از جمله شارژ سیستم‌های ذخیره انرژی وابسته ولتاژ، ساپورت توان راکتیو اینورتر پل وابسته به ولتاژ، کاستن توان اکتیو اعمالی اینورتر پل وابسته به ولتاژ مقایسه می‌شوند. مشاهده می‌شود که روش کنترل توان راکتیو متغیر (مثلاً ضریب افتی مختلف) به طور مؤثرتری از کنترل توان راکتیو ثابت، در مورد سیستم‌های ذخیره انرژی به کم کردن سائز باتری کمک می‌کند و با در نظر گرفتن سائز باتری یکسان، توانمندی بیشتری در رابطه با مهار ولتاژ شبکه نشان می‌دهد [۳۶، ۶۵]. استفاده از روش ضریب قدرت/ توان اکتیو به همراه ذخیره‌ساز انرژی در حالت مشارکت پایین پل‌ها، بازدهی و راندمان بیشتری دارد، در عوض استفاده از روش کنترل توان راکتیو به همراه ذخیره‌ساز انرژی، بازدهی بهتری در حالت مشارکت بالای پل‌ها در شبکه توزیع فشار ضعیف دارد.

### ۳-۶-۳- کنترل توان راکتیو به همراه تپ‌چنجر قابل تنظیم زیر بار

به طور کلی اثرگذاری استفاده از تپ چنجر قابل تنظیم زیر بار به تنهایی، بیشتر از استفاده از روش کنترل توان راکتیو بر روی کاستن اضافه ولتاژ می‌باشد، همچنین در روش کنترل توان راکتیو، ضریب سرویس بیشتری به بار متصل به ترانسفورماتور نسبت به به کارگیری تپ‌چنجر داریم. ترکیب این دو روش، باعث افزایش قدرت کنترل ولتاژ در شبکه، و بارپذیری ترانسفورماتور خواهد شد [۶۶]. بنابراین بهترین نتیجه زمانی حاصل خواهد شد که تغییر تپ ترانسفورماتور به عنوان کنترل اولیه، و کنترل توان راکتیو به عنوان کنترل کمکی مورد استفاده قرار گیرد [۶۷-۷۱].

به طور کلی برای این ترکیب دو روش عملیاتی وجود دارد. در روش اول تپ‌چنجر اضافه ولتاژهای به وجود آمده در شبکه را کاهش داده و کنترل توان راکتیو (اینورتر پل فتوولتاییک/ جبران‌ساز استاتیک سنکرون<sup>۱۵</sup>) به عنوان پشتیبان از تغییرات بیش از حد موقعیت تپ ترانسفورماتور جلوگیری کرده و باعث افزایش عمر تپ‌چنجر خواهد شد. از مزیت این روش می‌توان به کمتر شدن هزینه‌ها، به دلیل استفاده از جبران‌سازهای استاتیک سنکرون کوچکتر اشاره کرد. استفاده از ترکیب جبران‌ساز استاتیک/ تپ‌چنجر می‌تواند ارزان قیمت‌تر از به کارگیری جبران‌ساز استاتیک به تنهایی باشد [۷۲]. روش دوم به این شکل است که اینورتر پل فتوولتاییک/ جبران‌ساز استاتیک سنکرون ولتاژ شبکه را کنترل کرده، و در صورت ناکافی بودن قابلیت کنترل ولتاژ آن، تپ‌چنجر ترانسفورماتور فعال خواهد شد. در [۷۳] استراتژی هماهنگی توان راکتیو بر اساس اطلاعات پیش‌بینی شده پروفایل بار و تابش خورشید، می‌تواند در کاهش تپ زدن‌های تپ‌چنجرها و عملکرد بهینه رگولاتورهای ولتاژ خط استفاده گردد. آخرین گزینه اتخاذ شده در این روش نیز، در صورت عدم توانایی کافی کاستن اضافه ولتاژ در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف در حضور گسترده پل‌های فتوولتاییک، استفاده از روش کاستن توان اکتیو اینورتر پل‌ها می‌باشد.

### ۳-۶-۴- سیستم ذخیره انرژی به همراه تپ‌چنجر قابل تنظیم زیر بار

این روش ترکیبی باعث کاهش استرس از روی تپ‌چنجر ترانسفورماتور می‌شود. در زمان‌های بار غیر پیک، عملکرد تپ‌چنجر در راستای کاهش ولتاژ شبکه و عملکرد سیستم‌های ذخیره انرژی توزیع شده، در جهت شارژ توان تولیدی مازاد نیروگاه‌های تولید پراکنده موجود در طول فیدر می‌باشد. در زمان‌های پیک بار، سیستم‌های ذخیره انرژی توزیع شده به منظور کاستن پیک بار، دشارژ می‌شوند. لازمه این اعمال، هماهنگی کنترلیها، به منظور هماهنگ سازی عمل شارژ و دشارژ آنها می‌باشد [۷۴-۷۶]. در [۷۷]، هدف کاستن اضافه ولتاژ، و حداکثرسازی بهره خالص سیستم فتوولتاییک بر اساس بهینه سازی ظرفیت اینورتر پل و سیستم ذخیره انرژی، می‌باشد. برای این منظور، از بهینه سازی به روش ازدحام ذرات استفاده شده است. در این مرجع، از یک کنترل بر اساس منطق فازی، به منظور کم کردن تپ زدن‌های تپ‌چنجر استفاده شده است.





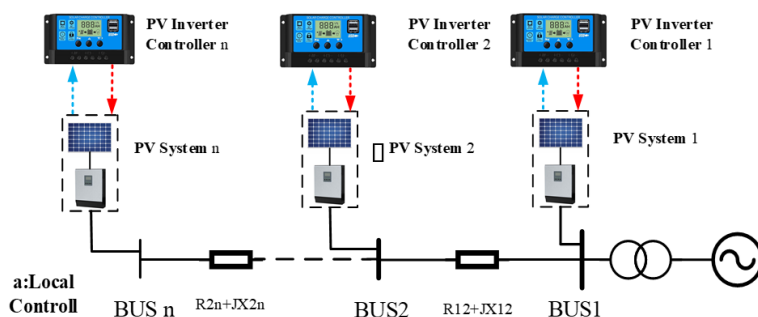
#### ۴- استراتژی‌های کنترلی مرسوم اینورتر پنل‌های فتوولتاییک

در این قسمت از مقاله، ابتدا در مورد استفاده از روش‌های طرفدار کنترل محلی، اینورتر پنل‌ها بر پایه ولتاژ محلی، بحث شده و سپس به طور خلاصه دیگر استراتژی‌های قابل اجرا که روش‌های توزیع شده، و روش مرکزی می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفته و به مزایا و معایب هر یک اشاره می‌گردد.

##### ۴-۱- استراتژی کنترل محلی

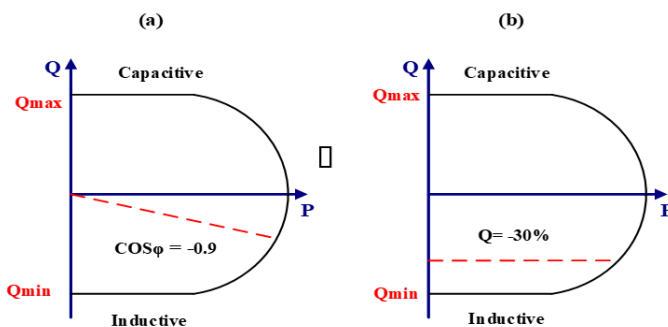
در این روش کنترلی اینورتر پنل، به طور محلی با اندازه‌گیری از ترمینال خود، مستقل از سایر اینورتر پنل‌ها عمل می‌کند، شکل (۱۱). موارد مختلفی از این نوع روش کنترلی بر اساس متغیر خروجی که کنترل شده وجود دارد که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. در مجموع روش‌های کنترلی بر پایه ولتاژ محلی، عمدتاً به سه بخش تقسیم می‌شوند: کنترل ثابت توان راکتیو تزریقی، مانند  $Q$  ثابت یا ضریب قدرت فیکس شده، شکل (۱۲): عملکرد اینورتر پنل‌های فتوولتاییک: **a.** حالت ضریب قدرت فیکس شده **b.** حالت  $Q$  ثابت

(. کنترل توان راکتیو (توان راکتیوی که تابعی از ولتاژ محلی است)، شکل (۱۳). کاستن توان اکتیو، (توان اکتیوی که تابعی از ولتاژ محلی است)، شکل (۱۴).



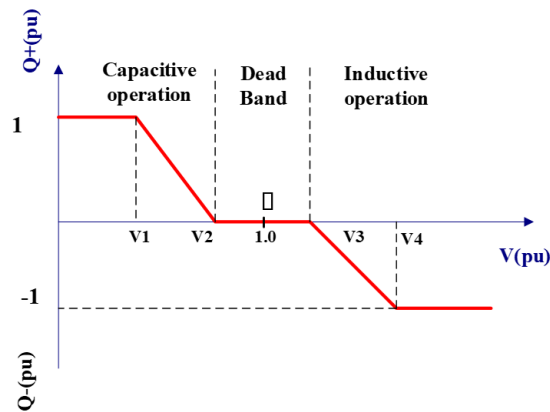
شکل (۱۱): شماتیک بلوک دیاگرام استراتژی کنترلی محلی اینورتر پنل‌ها در شبکه توزیع

سه روش کنترلی محلی ذکر شده می‌توانند در سیستم فتوولتاییک اجرا شوند، که در شکل (۱۵) نشان داده شده است. روش‌های کنترل محلی توان دیگری مانند توان راکتیو (توان اکتیو) یا ضریب قدرت (توان اکتیو) ممکن است در متن و ادبیات دیده شود، ولی این روش‌ها در عمل به ندرت در اینورتر پنل‌ها استفاده می‌شوند، که دلیل آن این است که در مقایسه با روش‌های کنترل توان راکتیو و کاستن توان اکتیو، دارای مزایای کمتری می‌باشد. شکل (۱۱)، شماتیکی از استراتژی کنترلی محلی و چگونگی ارتباط بین اینورترهای متصل به پنل‌ها را در این روش نشان می‌دهد.

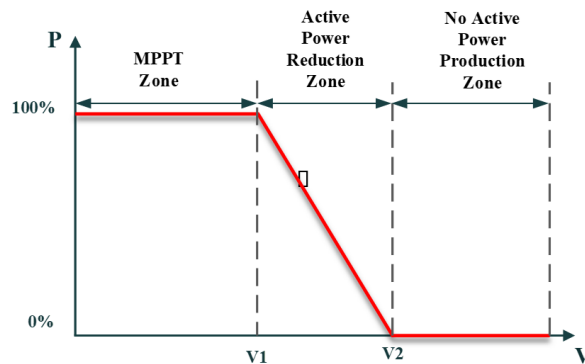


شکل (۱۲): عملکرد اینورتر پنل‌های فتوولتاییک: **a.** حالت ضریب قدرت فیکس شده **b.** حالت  $Q$  ثابت





شکل (۱۳): عملکرد اینورتر پنل‌های فتوولتائیک : مود کنترل توان راکتیو (کنترل افتی)



شکل (۱۴): مناطق عملکردی اینورتر پنل‌ها : مود کم کردن سطح توان اکتیو تولیدی بر اساس ولتاژ محلی. ۱. اگر ولتاژ کوچکتر از مقدار  $V_1$  (Vmax-APC) باشد، در این صورت اینورتر پنل در منطقه ی حداکثر توان اکتیو تولیدی (MPPT) کار می‌کند، ۲. اگر ولتاژ بین  $V_1$  ,  $V_2$  باشد، اینورتر پنل در محدوده‌ی کاستن توان اکتیو تولیدی کار خواهد کرد، ۳. اگر ولتاژ بزرگتر از  $V_2$  باشد، اینورتر پنل در محدوده‌ای بدون تولید توان اکتیو، کار خواهد کرد.

که با توجه به شکل (۱۳)، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}
 & Q_{max} & \text{if } V_{mon.pu} < v_1 \\
 & \left( \frac{V_{mon.pu} - v_1}{v_1 - v_2} \right) * Q_{max} & \text{if } v_1 < V_{mon.pu} < v_2 \\
 & 0 & \text{if } v_2 < V_{mon.pu} < v_3 \\
 & - \left( \frac{V_{mon.pu} - v_3}{v_4 - v_3} \right) * Q_{max} & \text{if } v_3 < V_{mon.pu} < v_4 \\
 & -Q_{max} & \text{if } V_{mon.pu} > v_4
 \end{aligned} \tag{۴}$$

$$Q_{max} = \sqrt{S_{max}^2 - P_{mppt}^2} \tag{۵}$$



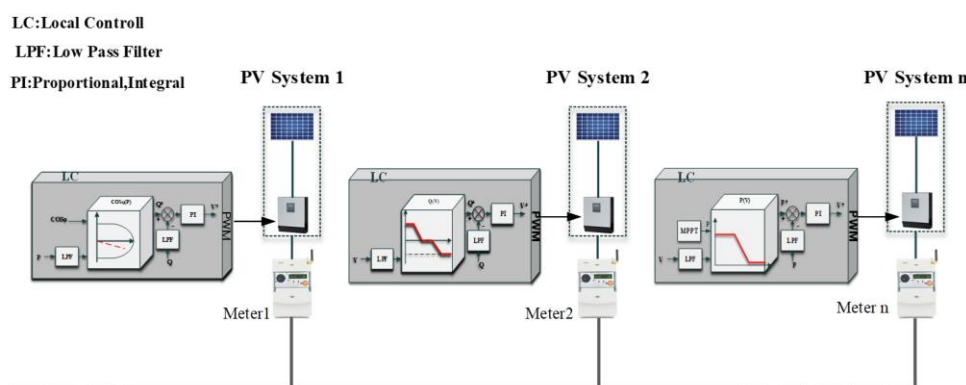


که در رابطه ی فوق،  $Q_{min}$  و  $Q_{max}$  به ترتیب حداکثر قابلیت توان راکتیو اینورتر پنل در حالت خازنی و سلفی بوده و  $V_{mon.pu}$  ولتاژ مانیتورینگ شده ی ترمینال پنل فتوولتاییک بر حسب پیرونیست می باشد. هم چنین  $V_1$  و  $V_4$  به ترتیب حد پایین و حد بالای ولتاژ مجاز شبکه می باشند.

هم چنین با توجه به شکل (۱۴) خواهیم داشت:

$$P_{PV} \begin{cases} \frac{V_{mon.pu} - v_1}{V_1 - V_2} * P_{PV} & \text{if } V_{mon.pu} < v_1 \\ 0 & \text{if } v_1 < V_{mon.pu} < v_2 \\ P_{PV} & \text{if } V_{mon.pu} \leq v_2 \end{cases} \quad (6)$$

که در آن،  $V_{mon.pu}$  ولتاژ مانیتورینگ شده ی خروجی اینورتر پنل، و  $P_{PV}$  حداکثر توان نامی پنل فتوولتاییک می باشد. مشاهده می شود که اگر ولتاژ کوچکتر از مقدار  $V_1$  باشد، در این صورت اینورتر پنل در منطقه حداکثر توان اکتیو تولیدی کار می کند، و اگر ولتاژ بین  $V_1$  و  $V_2$  باشد، اینورتر پنل در محدوده ی کاستن توان اکتیو تولیدی کار خواهد کرد، هم چنین اگر ولتاژ بزرگتر از  $V_2$  باشد، اینورتر پنل در محدوده ای بدون تولید توان اکتیو، کار خواهد کرد. در ابتدا باید گفت که به طور کلی، دو روش کنترل توان راکتیو فیکس شده و اکتیو، جهت کنترل اضافه ولتاژ و کاستن نوسانات ولتاژ، به ظرفیت اینورتر پنل ها، ترانسفورماتور بار بالادست و هر ترانسفورماتور موجود در مسیر، تلفات خط وابسته است [۷۸].



شکل (۱۵): روش های کنترل محلی اجرایی توسط اینورتر پنل ها، خانه ۱: ضریب قدرت فیکس شده، خانه ۲:  $Q(V)$ ، خانه  $n$ :  $P(V)$

در [۷۹] اثرگذاری بر روی مهار اضافه ولتاژ از طریق آنالیز اینورتر پنل ها با در نظر گرفتن فانکشن حساسیت به ولتاژ، موقعیت اینورترها و مقدار توان اکتیو و راکتیو تولیدی آن محاسبه می شود. در مورد نزدیک ترین اینورتر پنل به ترانسفورماتور که به شبکه متصل شده، مشاهده می شود که اثر توان راکتیو بر روی ولتاژ، اغلب بیشتر از اثر توان اکتیو می باشد، که علت این امر به دلیل تسلط راکتانس اتصال کوتاه ترانسفورماتور بر مشخصات خط، در آن موقعیت می باشد.

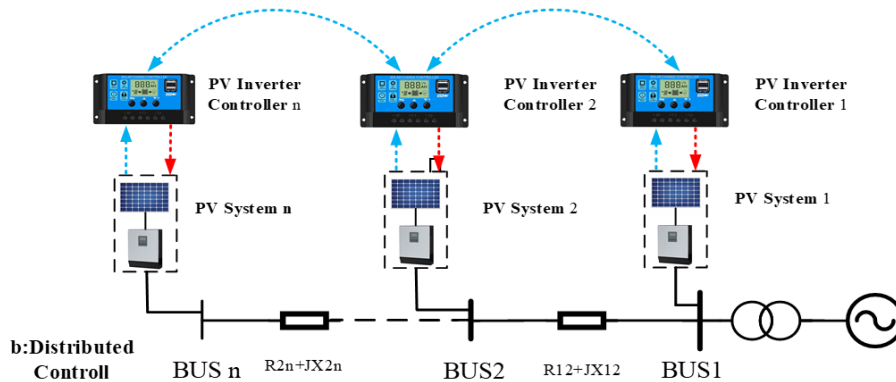
هر چند که اثر کنترل توان اکتیو در ساپورت ولتاژ، زمانی که فاصله بین اینورتر پنل ها و ترانسفورماتور به اندازه کافی زیاد می شود، (انتهای فیدر)، بیشتر از اثر کنترل توان راکتیو خواهد شد. بر اساس نتایج [۸۰]، اضافه ولتاژ به طور موثرتری با اتخاذ یک روش با شیب کنترلی متغیر، در مقایسه با شیب کنترلی ثابت کاهش پیدا خواهد کرد، هر چند که روش کنترلی شیب متغیر، ممکن است با کاستن بیشتر توان اکتیو تولیدی مواجه شود. در عین حال استفاده از ظرفیت کنترل توان راکتیو می تواند باعث کاهش مقدار توان اکتیو کاسته شده در کل فرایند بهبود تنظیم ولتاژ گردد.

#### ۴-۲- استراتژی کنترل توزیع شده

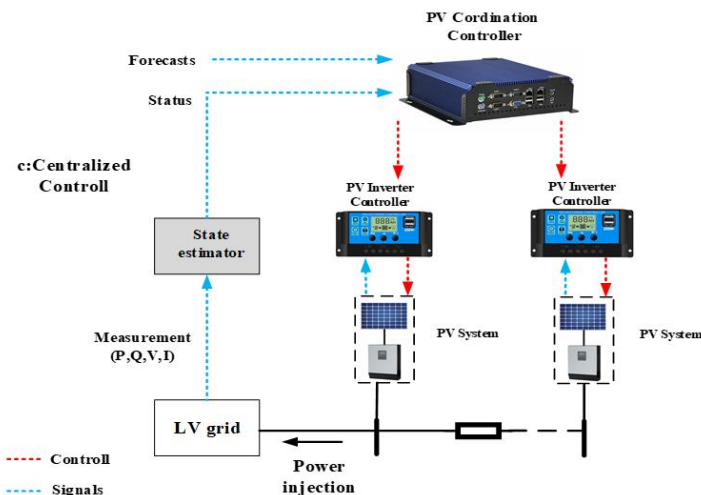




استراتژی‌های کنترلی توزیع شده با به کارگیری از لینک‌های ارتباطی محدود، به تبادل اطلاعات بین واحدهای مختلف فتوولتائیک مبادرت می‌کنند. هدف یک ساختار کنترلی توزیع شده دستیابی به یک سازماندهی داخلی در شبکه توزیع می‌باشد. در این نوع روش، کنترلرهای توزیع شده در واحدهای تولیدی فتوولتائیک، فقط به ارتباط با واحدهای همسایه خود نیاز دارند، شکل (۱۶). اتخاذ و تنظیم ظرفیت تولید توان اکتیو و راکتیو هر واحد، به منظور پشتیبانی ولتاژ در شبکه توزیع در [۸۱] در نظر گرفته شده است، علاوه بر این یک روش کنترل توزیع شده، به منظور تنظیم ست پوینت توان اکتیو و راکتیو اینورترها، برای مهار اضافه ولتاژ پیشنهاد شده است. در این روش، کنترل ولتاژ شبکه از طریق کنترل توان راکتیو هر اینورتر پیل انجام می‌شود و در صورت ضرورت، توان اکتیو تولیدی پیل فتوولتائیک، کاسته خواهد شد. روش پیشنهادی نه احتیاجی به جزئیات مدل دارد، و نه به پارامترهای شبکه توزیع. در [۸۲] یک الگوریتم جامع توزیع شده که از دستگاه‌های اندازه‌گیری محلی و خطوط ارتباطی با اطراف خود استفاده می‌کند، پیشنهاد شده است، که به حل مسئله آنبالانسی ولتاژ در یک شبکه توزیع چهار سیمه می‌پردازد. در این روش، کنترل توان راکتیو اینورتر پیل‌ها، به منظور بهبود پروفیل ولتاژ در طول فیدر، از طریق هماهنگی و به روزرسانی مقادیر مرجع توان راکتیو هر اینورتر صورت می‌گیرد.



شکل (۱۶): شماتیک بلوک دیاگرام استراتژی کنترلی توزیع شده اینورتر پیل‌ها در شبکه توزیع



شکل (۱۷): شماتیک بلوک دیاگرام استراتژی کنترلی مرکزی اینورتر پیل‌ها در شبکه توزیع

#### ۳-۴- استراتژی کنترلی مرکزی

در یک زیرساخت کنترلی مرکزی توانایی جمع‌آوری اطلاعات از اینورترها و دیگر تجهیزات در شبکه توزیع و انتقال آنها به کنترلر اصلی وجود دارد، که به طور معمول یک واحد محاسباتی مرکزی، با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود، عملکرد بهینه را اتخاذ می‌کند، شکل (۱۷). این محاسبات جدید می‌تواند تنظیمات افقی و یا ست پوینت توان برای اینورتر پیل‌ها را به صورت فردی حاصل کند، در حالتی که از طریق کنترل محلی مشخص می‌شود [۸۳]. در [۸۴] یک تابع هدف، به منظور حداقل‌سازی تلفات توان و نوسانات ولتاژ در شبکه نشان داده شده است. در [۸۵] یک روش توزیع شده برای اینورتر پیل‌ها پیشنهاد شده که در آن، تلفات توان اکتیو در شبکه،





میزان توان اکتیو کاسته شده، و انحراف از ولتاژ مورد قبول را مینیمم می‌کند. در این مرجع مسئله بهینه سازی با استفاده از روش برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی، با در نظر گرفتن چند نقطه شروع در نرم افزار متلب، حل می‌گردد.

در [۸۶] روش‌های جدید کنترلی بر پایه هماهنگی استراتژی‌های کنترل توان راکتیو محلی و مرکزی را، برای اینورتر پنل‌ها پیشنهاد داده است. در [۸۷] یک روش سه سطحی کنترلی شامل کنترل محلی، کنترل منطقه‌ای و کنترل مرکزی، با توجه به هر بازه زمانی، طراحی شده است. در سطح کنترل محلی و منطقه‌ای، حداقل سازی انحرافات ولتاژی از طریق بهینه کردن توان اکتیو و تولیدی هر اینورتر پنل فتوولتاییک، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سطح کنترل مرکزی نیز، از طریق یک پخش بار بهینه، حداقل سازی نوسانات ولتاژی، نرخ تغییر موقعیت تپ‌چنجر ترانسفورماتورها و توان اکتیو کاسته شده کل پنل‌ها، انجام می‌گیرد. در [۸۸] یک الگوریتم ژنتیک چند هدفه به منظور دستیابی به هماهنگی کنترلی بین ترانسفورماتور توزیع فشار ضعیف و اینورتر پنل‌ها که از روش کنترل توان راکتیو استفاده می‌کنند، باعث افزایش مشارکت توان راکتیو در نزدیک‌ترین اینورتر پنل‌ها به ترانسفورماتور، در موقعیت‌های دارای اضافه ولتاژ می‌شود.

جدول (۳) مقایسه ای از استراتژی‌های مختلف کنترلی اینورتر پنل‌های فتوولتاییک را نشان می‌دهد.

جدول (۳): مقایسه‌ی استراتژی‌های مختلف کنترلی اینورتر پنل‌های فتوولتاییک

| استراتژی کنترلی | مزایا                                                                                                       | معایب                                                                                         |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| کنترل مرکزی     | - توانایی کنترل بهتر<br>- تنظیم ولتاژ بهینه                                                                 | - وابسته به زیر ساخت ارتباطی<br>- مستقل نبودن واحدها                                          |
| کنترل توزیع شده | - امکان دستیابی به اهداف کنترلی محلی و کلی<br>- توانایی نگه داشتن پایداری سیستم در بروز نقص در لینک ارتباطی | - عدم ضمانت در همگرایی اعمال کنترلی<br>- نیاز به فرمت مشترک اطلاعات و واسطه جهت تبادل اطلاعات |
| کنترل محلی      | - اجرای آسان<br>- عدم نیاز به لینک ارتباطی                                                                  | - عدم تاثیر در تغییرات بزرگ شرایط عملکردی                                                     |

## ۵- نتیجه گیری

این مقاله مروری بر روی چالش‌های به وجود آمده برای شبکه‌های توزیع فشار ضعیف با مشارکت بالای پنل‌های فتوولتاییک انجام می‌دهد، که مهم‌ترین آنها می‌توان به عکس شدن جهت توان و بروز اضافه ولتاژ اشاره کرد. همچنین به طور خلاصه روش‌ها و استانداردهای مختلف مقابله با اضافه ولتاژ در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف با حضور بالای پنل‌ها، معرفی و مزایا و معایب هر یک مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، روش‌های کاستن توان اکتیو و کنترل توان راکتیو به عنوان توابع عملکردی اینورتر هوشمند پنل‌ها، و همچنین به کارگیری توام آنها، جهت پشتیبانی ولتاژ در شبکه توزیع فشار ضعیف با حضور گسترده‌ی پنل‌های فتوولتاییک، بررسی گردید. روش‌های هیبریدی با به کارگیری ترکیبی از این روش‌ها، به منظور افزایش بهره‌وری و پوشش معایب یکدیگر بررسی شد، که قسمت عمده‌ی موضوع تحقیقات آینده در این حوزه را به خود اختصاص خواهد داد. در نهایت روش‌های مختلف کنترلی مرکزی، توزیع شده و محلی مورد استفاده در این روش‌ها، بررسی شده و ویژگی‌ها و الزامات اجرای هر یک به طور خلاصه بیان شد.

## مراجع

- [1] S. Europe, "Global market outlook for solar power 2022–2026," *Solar Power Europe: Brussels, Belgium*, 2022.
- [2] P. Kanakasabapathy and K. Suresh, "A Review of Voltage Stability Issues in Distribution System Influenced By High PV Penetration and Its Mitigation Techniques," *International Journal of*





- Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 13, no. 1, pp. 236-244, 2023, doi: 10.20508/ijrer.v13i1.13388.g8678
- [3] P. Chaudhary and M. Rizwan, "Voltage regulation mitigation techniques in distribution system with high PV penetration: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3279-3287, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.017.
  - [4] M. Karimi, H. Mokhlis, K. Naidu, S. Uddin, and A. A. Bakar, "Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network-A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 594-605, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.08.042.
  - [5] S. Shivashankar, S. Mekhilef, H. Mokhlis, and M. Karimi, "Mitigating methods of power fluctuation of photovoltaic (PV) sources-A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 1170-1184, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.059.
  - [6] R. Tonkoski, D. Turcotte, and T. H. El-Fouly, "Impact of high PV penetration on voltage profiles in residential neighborhoods," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 3, pp. 518-527, 2012, doi: 10.1109/TSTE.2012.2191425.
  - [7] D. Almeida, J. Pasupuleti, J. Ekanayake, and E. Karunarathne, "Mitigation of overvoltage due to high penetration of solar photovoltaics using smart inverters volt/var control," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci*, vol. 19, no. 3, pp. 1259-1266, 2020, doi: 10.11591/ijeecs.
  - [8] S. Mikulić and B. Čučić, "Voltage regulated distribution transformer with new vacuum OLTC," in *The 12th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2020)*, 2020, vol. 2020, pp. 225-230: IET, doi: 10.1049/icp.2021.1207.
  - [9] G. Mauri et al., "Control and automation systems for Electricity Distribution Networks (EDN) of the future". *CIGRE (International Council on Large Electric Systems)*, 2017.
  - [10] M. N. I. Sarkar, L. G. Meegahapola, and M. Datta, "Reactive power management in renewable rich power grids: A review of grid-codes, renewable generators, support devices, control strategies and optimization algorithms," *Ieee Access*, vol. 6, pp. 41458-41489, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2838563.
  - [11] M. E. Baran and F. F. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution systems," *IEEE Transactions on power Delivery*, vol. 4, no. 1, pp. 725-734, 1989, doi: 10.1109/61.19265.
  - [12] J. Ekanayake and M. Jenkins, "A three-level advanced static VAr compensator," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 540-545, 1996, doi: 10.1109/61.484140.
  - [13] M. Emarati, M. Barani, H. Farahmand, J. Aghaei, and P. C. del Granado, "A two-level over-voltage control strategy in distribution networks with high PV penetration," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 130, p. 106763, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.106763.
  - [14] M. D. Talal Alazemi, and Mohammed Radi, "TSO/DSO Coordination for RES Integration: A Systematic Literature Review," <https://www.mdpi.com/journal/energies>, 2022, doi: 10.3390/en15197312.
  - [15] A. Sangwongwanich, Y. Yang, and F. Blaabjerg, "A sensorless power reserve control strategy for two-stage grid-connected PV systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 11, pp. 8559-8569, 2017, doi: 10.1109/TPEL.2017.2648890.
  - [16] Q. Peng, A. Sangwongwanich, Y. Yang, and F. Blaabjerg, "Grid-friendly power control for smart photovoltaic systems," *Solar Energy*, vol. 210, pp. 115-127, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.05.001.
  - [17] H. Khan, S. J. Chacko, B. G. Fernandes, and A. Kulkarni, "Reliable and effective ride-through controller operation for smart PV systems connected to LV distribution grid under abnormal voltages," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 3, pp. 2371-2384, 2019, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2918620.
  - [18] M. K. Mishra and V. N. Lal, "An enhanced control strategy to mitigate grid current harmonics and power ripples of grid-tied PV system without PLL under distorted grid voltages," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 10, no. 4, pp. 4587-4602, 2021, doi: /10.1109/JESTPE.2021.3107869.
  - [19] D. C. Nagarajan, G. Neelakrishnan, V. Sundarajan, and D. Vinoth, "Simplified Reactive Power Control for Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume: 61, Issue: 5, May 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2271600.
  - [20] Y. Yang, H. Wang, and F. Blaabjerg, "Reactive power injection strategies for single-phase photovoltaic systems considering grid requirements," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 6, pp. 4065-4076, 2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2346692.



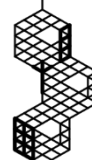


- [21] Y. Yang, F. Blaabjerg, H. Wang, and M. G. Simões, "Power control flexibilities for grid-connected multi-functional photovoltaic inverters," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 4, pp. 504-513, 2016, doi: 10.1049/iet-rpg.2015.0133.
- [22] F. Blaabjerg, Y. Yang, D. Yang, and X. Wang, "Distributed power-generation systems and protection," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1311-1331, 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2696878.
- [23] C. Utama, C. Meske, J. Schneider, and C. Ulbrich, "Reactive power control in photovoltaic systems through (explainable) artificial intelligence," *Applied Energy*, vol. 328, p. 120004, 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120004.
- [24] C. Zhang and Y. Xu, "Hierarchically-Coordinated Voltage/VAR Control of Distribution Networks Using PV Inverters," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 4, pp. 2942-2953, 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.2968394.
- [25] Y. Z. Gerdroodbari, R. Razzaghi, and F. Shahnia, "Decentralized control strategy to improve fairness in active power curtailment of PV inverters in low-voltage distribution networks," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 12, no. 4, pp. 2282-2292, 2021, doi: 10.1109/TSTE.2021.3088873.
- [26] T. T. Mai, A. N. M. Haque, P. P. Vergara, P. H. Nguyen, and G. Pemen, "Adaptive coordination of sequential droop control for PV inverters to mitigate voltage rise in PV-Rich LV distribution networks," *Electric Power Systems Research*, vol. 192, p. 106931, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106931.
- [27] H. Almasalma, S. Claeys, and G. Deconinck, "Peer-to-peer-based integrated grid voltage support function for smart photovoltaic inverters," *Applied Energy*, vol. 239, pp. 1037-1048, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.249.
- [28] R. Tonkoski, L. A. Lopes, and T. H. El-Fouly, "Coordinated active power curtailment of grid connected PV inverters for overvoltage prevention," *IEEE Transactions on sustainable energy*, vol. 2, no. 2, pp. 139-147, 2010, doi: 10.1109/TSTE.2010.2098483.
- [29] G. C. Kryonidis, E. O. Kontis, A. I. Chrysoschos, C. S. Demoulias, and G. K. Papagiannis, "A coordinated droop control strategy for overvoltage mitigation in active distribution networks," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 5260-5270, 2017, doi: 10.1109/TSG.2017.2685686.
- [30] J. Jung, A. Onen, R. Arghandeh, and R. P. Broadwater, "Coordinated control of automated devices and photovoltaic generators for voltage rise mitigation in power distribution circuits," *Renewable Energy*, vol. 66, pp. 532-540, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.12.039.
- [31] M. Katsanevakis, R. A. Stewart, and J. Lu, "Aggregated applications and benefits of energy storage systems with application-specific control methods: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, pp. 719-741, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.050.
- [32] J. Haas *et al.*, "Challenges and trends of energy storage expansion planning for flexibility provision in low-carbon power systems—a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 603-619, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.201.
- [33] S. Tsianikas, J. Zhou, D. P. Birnie III, and D. W. Coit, "Economic trends and comparisons for optimizing grid-outage resilient photovoltaic and battery systems," *Applied energy*, vol. 256, p. 113892, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113892.
- [34] T. Gush, C.-H. Kim, S. Admasie, J.-S. Kim, and J.-S. Song, "Optimal smart inverter control for PV and BESS to improve PV hosting capacity of distribution networks using slime mould algorithm," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 52164-52176, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3070155.
- [35] L. Wang, D. H. Liang, A. F. Crossland, P. C. Taylor, D. Jones, and N. S. Wade, "Coordination of multiple energy storage units in a low-voltage distribution network," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 6, pp. 2906-2918, 2015, doi: 10.1109/TSG.2015.2452579.
- [36] M. N. Kabir, Y. Mishra, G. Ledwich, Z. Y. Dong, and K. P. Wong, "Coordinated control of grid-connected photovoltaic reactive power and battery energy storage systems to improve the voltage profile of a residential distribution feeder," *IEEE Transactions on industrial Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 967-977, 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2299336.
- [37] Y. Wang, K. Tan, X. Y. Peng, and P. L. So, "Coordinated control of distributed energy-storage systems for voltage regulation in distribution networks," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 1132-1141, 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2462723.
- [38] M. J. E. Alam, K. M. Muttaqi, and D. Sutanto, "Mitigation of rapid voltage variations caused by passing clouds in distribution networks with solar PV using energy storage," in *8th International*





- Conference on Electrical and Computer Engineering, 2014, pp. 305-308: IEEE, doi: 10.1109/ICECE.2014.7026821.
- [39] M. Beaudin, H. Zareipour, A. Schellenberglobe, and W. Rosehart, "Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review," *Energy for sustainable development*, vol. 14, no. 4, pp. 302-314, 2010, doi: 10.1016/j.esd.2010.09.007.
- [40] W. A. Omran, M. Kazerani, and M. Salama, "Investigation of methods for reduction of power fluctuations generated from large grid-connected photovoltaic systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 1, pp. 318-327, 2010, doi: 10.1109/TEC.2010.2062515.
- [41] B. Mukhopadhyay and D. Das, "Multi-objective dynamic and static reconfiguration with optimized allocation of PV-DG and battery energy storage system," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 124, p. 109777, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109777.
- [42] A. I. Nousedilis, G. C. Christoforidis, and G. K. Papagiannis, "Active power management in low voltage networks with high photovoltaics penetration based on prosumers' self-consumption," *Applied energy*, vol. 229, pp. 614-624, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.08.032.
- [43] V. Sharma, M. H. Haque, S. M. Aziz, and T. Kauschke, "Reducing Overvoltage-Induced PV Curtailment Through Reactive Power Support of Battery and Smart PV Inverters," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 123995-124008, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3454313.
- [44] T. Sutikno, W. Arsadiando, A. Wangsupphaphol, A. Yudhana, and M. Facta, "A Review of Recent Advances on Hybrid Energy Storage System for Solar Photovoltaics Power Generation," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 42346-42364, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3165798.
- [45] V. Nikam and V. Kalkhambkar, "A review on control strategies for microgrids with distributed energy resources, energy storage systems, and electric vehicles," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 1, 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12607.
- [46] M. M. Rana, M. Uddin, M. R. Sarkar, G. M. Shafiullah, H. Mo, and M. Atef, "A review on hybrid photovoltaic – Battery energy storage system: Current status, challenges, and future directions," *Journal of Energy Storage*, vol. 51, p. 104597, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104597.
- [47] X. Lin and R. Zamora, "Controls of hybrid energy storage systems in microgrids: Critical review, case study and future trends," *Journal of Energy Storage*, vol. 47, p. 103884, 2022, doi: 10.1016/j.est.2021.103884.
- [48] B. Yildiz *et al.*, "Real-world data analysis of distributed PV and battery energy storage system curtailment in low voltage networks," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 186, p. 113696, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113696.
- [49] H. Shareef, M. M. Islam, and A. Mohamed, "A review of the stage-of-the-art charging technologies, placement methodologies, and impacts of electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, pp. 403-420, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.06.033.
- [50] H. Aljarash, "OUTLOOK OF ELECTRIC VEHICLE MARKET: PREDICTING EV PRICES USING MACHINE LEARNING TECHNIQUES," in *Proceedings of the International Annual Conference of the American Society for Engineering Management.*, 2022, pp. 1-11: American Society for Engineering Management (ASEM).
- [51] T. Lehtola and A. Zahedi, "Solar energy and wind power supply supported by storage technology: A review," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 35, pp. 25-31, 2019, doi: 10.1016/j.seta.2019.05.013.
- [52] J. Ye *et al.*, "Cyber-physical security of powertrain systems in modern electric vehicles: Vulnerabilities, challenges, and future visions," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 4, pp. 4639-4657, 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2020.3045667.
- [53] C. Jiang, R. Torquato, D. Salles, and W. Xu, "Method to assess the power-quality impact of plug-in electric vehicles," *IEEE Transactions on Power delivery*, vol. 29, no. 2, pp. 958-965, 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2283598.
- [54] K. Clement-Nyns, E. Haesen, and J. Driesen, "The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid," *IEEE Transactions on power systems*, vol. 25, no. 1, pp. 371-380, 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2036481.
- [55] J. M. Foster, G. Trevino, M. Kuss, and M. C. Caramanis, "Plug-in electric vehicle and voltage support for distributed solar: Theory and application," *IEEE Systems Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 881-888, 2012, doi: 10.1109/JSYST.2012.2223534.



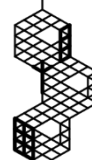


- [56] P. Siano, "Demand response and smart grids—A survey," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 30, pp. 461-478, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.10.022
- [57] H. T. Haider, O. H. See, and W. Elmenreich, "A review of residential demand response of smart grid," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 166-178, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.016
- [58] M. Shafie-khah, P. Siano, J. Aghaei, M. A. Masoum, F. Li, and J. P. Catalão, "Comprehensive review of the recent advances in industrial and commercial DR," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 7, pp. 3757-3771, 2019, doi: 10.1109/TII.2019.2909276
- [59] N. Shaukat *et al.*, "A survey on consumers empowerment, communication technologies, and renewable generation penetration within Smart Grid," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1453-1475, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.208
- [60] D. Wang, K. Meng, X. Gao, J. Qiu, L. L. Lai, and Z. Y. Dong, "Coordinated dispatch of virtual energy storage systems in LV grids for voltage regulation," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 6, pp. 2452-2462, 2017, doi: 10.1109/TII.2017.2769452
- [61] K. Baker, A. Bernstein, E. Dall'Anese, and C. Zhao, "Network-cognizant voltage droop control for distribution grids," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 2098-2108, 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2735379
- [62] A. Samadi, R. Eriksson, L. Söder, B. G. Rawn, and J. C. Boemer, "Coordinated active power-dependent voltage regulation in distribution grids with PV systems," *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 29, no. 3, pp. 1454-1464, 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2298614
- [63] J. Flicker and J. Johnson, "Photovoltaic ground fault detection recommendations for array safety and operation," *Solar Energy*, vol. 140, pp. 34-50, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.10.017
- [64] S. Hashemi and J. Østergaard, "Efficient control of energy storage for increasing the PV hosting capacity of LV grids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2295-2303, 2016, doi: 10.1109/TSG.2016.2609892
- [65] M. N. Kabir, Y. Mishra, G. Ledwich, Z. Xu, and R. Bansal, "Improving voltage profile of residential distribution systems using rooftop PVs and Battery Energy Storage systems," *Applied energy*, vol. 134, pp. 290-300, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.08.042
- [66] A. Kulmala, S. Repo, and B. Bletterie, "Avoiding adverse interactions between transformer tap changer control and local reactive power control of distributed generators," in *2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 2016, pp. 1-6: IEEE, doi: 10.1109/ISGTEurope.2016.7856315
- [67] M. R. Jafari, M. Parniani, and M. H. Ravanji, "Decentralized Control of OLTC and PV Inverters for Voltage Regulation in Radial Distribution Networks With High PV Penetration," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 6, pp. 4827-4837, 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3160375
- [68] A. Ali, K. Mahmoud, and M. Lehtonen, "Maximizing Hosting Capacity of Uncertain Photovoltaics by Coordinated Management of OLTC, VAR Sources and Stochastic EVs," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 127, p. 106627, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106627
- [69] A. Dutta, S. Ganguly, and C. Kumar, "Model predictive control-based optimal voltage regulation of active distribution networks with OLTC and reactive power capability of PV inverters," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 22, pp. 5183-5192, 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2020.0378
- [70] T. Gush and C.-H. Kim, "Robust Local Coordination Control of PV Smart Inverters With SVC and OLTC in Active Distribution Networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 39, no. 3, pp. 1610-1621, 2024, doi: 10.1109/TPWRD.2024.3374059
- [71] F. Spertino, A. Ciocia, A. Mazza, M. Nobile, A. Russo, and G. Chicco, "Voltage control in low voltage grids with independent operation of on-load tap changer and distributed photovoltaic inverters," *Electric Power Systems Research*, vol. 211, p. 108187, 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108187
- [72] R. Yan, B. Marais, and T. K. Saha, "Impacts of residential photovoltaic power fluctuation on on-load tap changer operation and a solution using DSTATCOM," *Electric Power Systems Research*, vol. 111, pp. 185-193, 2014, doi: 10.1016/j.epsr.2014.02.020
- [73] Y. P. Agalgaonkar, B. C. Pal, and R. A. Jabr, "Distribution voltage control considering the impact of PV generation on tap changers and autonomous regulators," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 182-192, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2279721





- [74] X. Liu, A. Aichhorn, L. Liu, and H. Li, "Coordinated control of distributed energy storage system with tap changer transformers for voltage rise mitigation under high photovoltaic penetration," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 897-906, 2012, doi: 10.1109/TSG.2011.2177501
- [75] T. Tewari, A. Mohapatra, and S. Anand, "Coordinated Control of OLTC and Energy Storage for Voltage Regulation in Distribution Network With High PV Penetration," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 12, no. 1, pp. 262-272, 2021, doi: 10.1109/TSTE.2020.2991017
- [76] H. A. Khan, M. Zuhaib, and M. Rihan, "Voltage fluctuation mitigation with coordinated OLTC and energy storage control in high PV penetrating distribution network," *Electric Power Systems Research*, vol. 208, p. 107924, 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.107924
- [77] O. Palizban and K. Kauhaniemi, "Hierarchical control structure in microgrids with distributed generation: Island and grid-connected mode," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 797-813, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.01.008
- [78] S. Pukhrem, M. Basu, M. F. Conlon, and K. Sunderland, "Enhanced network voltage management techniques under the proliferation of rooftop solar PV installation in low-voltage distribution network," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 2, pp. 681-694, 2016, doi: 10.1109/JESTPE.2016.2614986
- [79] E. Demirok, P. C. Gonzalez, K. H. Frederiksen, D. Sera, P. Rodriguez, and R. Teodorescu, "Local reactive power control methods for overvoltage prevention of distributed solar inverters in low-voltage grids," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 1, no. 2, pp. 174-182, 2011, doi: 10.1109/JPHOTOV.2011.2174821
- [80] L. Collins and J. Ward, "Real and reactive power control of distributed PV inverters for overvoltage prevention and increased renewable generation hosting capacity," *Renewable Energy*, vol. 81, pp. 464-471, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.03.012
- [81] F. Olivier, P. Aristidou, D. Ernst, and T. Van Cutsem, "Active management of low-voltage networks for mitigating overvoltages due to photovoltaic units," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 926-936, 2015, doi: 10.1109/TSG.2015.2410171
- [82] M. Zeraati, M. E. H. Golshan, and J. M. Guerrero, "Voltage quality improvement in low voltage distribution networks using reactive power capability of single-phase PV inverters," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 10, no. 5, pp. 5057-5065, 2018, doi: 10.1109/TSG.2018.2874381
- [83] N. Karthikeyan, J. R. Pillai, B. Bak-Jensen, and J. W. Simpson-Porco, "Predictive control of flexible resources for demand response in active distribution networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 4, pp. 2957-2969, 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2898425
- [84] H.-G. Yeh, D. F. Gayme, and S. H. Low, "Adaptive VAR control for distribution circuits with photovoltaic generators," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 3, pp. 1656-1663, 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2183151
- [85] E. Dall'Anese, S. V. Dhople, and G. B. Giannakis, "Optimal dispatch of photovoltaic inverters in residential distribution systems," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 487-497, 2014, doi: 10.1109/TSTE.2013.2292828
- [86] S. Weckx, C. Gonzalez, and J. Driesen, "Combined central and local active and reactive power control of PV inverters," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 776-784, 2014, doi: 10.1109/TSTE.2014.2300934
- [87] K. Mahmoud and M. Lehtonen, "Three-level control strategy for minimizing voltage deviation and flicker in PV-rich distribution systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 120, p. 105997, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.105997
- [88] M. Juamperez, G. Yang, and S. B. Kjær, "Voltage regulation in LV grids by coordinated volt-var control strategies," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 2, no. 4, pp. 319-328, 2014, doi: 10.1007/s40565-014-0072-0



- 
- <sup>1</sup> Renewable energy source (RES)
  - <sup>2</sup> Photovoltaic panel
  - <sup>3</sup> Distribution system operator (DSO)
  - <sup>4</sup> Active power curtailment (APC)
  - <sup>5</sup> On load tap changer (OLTC)
  - <sup>6</sup> Reactive power control (RPC)
  - <sup>7</sup> Maximum power point tracking (MPPT)
  - <sup>8</sup> Droop control
  - <sup>9</sup> Pulse width modulation (PWM)
  - <sup>10</sup> State of charge (SOC)
  - <sup>11</sup> Ramp Rate Control
  - <sup>12</sup> Vehicle to grid (V2G)
  - <sup>13</sup> Heat pump
  - <sup>14</sup> Coefficient variable droop
  - <sup>15</sup> Static synchronous compensator (STATCOM)