Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 15 - No. 2 – Summer 2026
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Reveiw Article

A Review of Three Important Power Quality Phenomena (Voltage Sag, Voltage Swell, and Voltage Interruption) in the Modern Electrical Energy Distribution System

Majid Dehghani[*1,2], ***Assistant Professor***, **Mehdi Riahinasab**[1,3], ***Assistant Professor***, **Amir Hossein Eshghi**[1,2], ***Assistant Professor***

[1]Smart Microgrid Research Center, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, dehghani@pel.iaun.ac.ir
[2]Department of Electrical Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, amh_eshghi@iau.ac.ir
[3]Digital Processing and Machine Vision Research Center, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, m.riahinasab@pel.iaun.ac.ir

Abstract:
With the increasing expansion of nonlinear loads, renewable energy sources (such as photovoltaics and wind turbines), and industrial automation, power quality has become a critical component of the stability and efficiency of modern electrical power distribution networks. Among them, three main voltage phenomena, voltage sag, voltage swell, and voltage interruption, have the largest contribution to power quality incidents due to their ability to induce destructive stresses on sensitive electronic equipment. This paper provides an overview of the nature, causes, and economic and operational consequences of these three key phenomena in the context of smart distribution networks. Voltage sag, which is often caused by sudden connections, can lead to tripping of industrial controllers and process shutdowns, while voltage swell, which usually occurs due to sudden removal of large loads or asymmetrical faults, challenges the life of equipment insulation. Voltage blackouts, which are the complete loss of voltage for a certain period of time due to malfunctioning protection systems or physical faults, cause the greatest financial losses in continuous industries. In addition to describing the causes, this study analyzes countermeasures. Special emphasis is placed on the use of advanced power electronics devices such as dynamic voltage compensators to quickly correct voltage swells and overvoltage sag, as well as uninterruptible power supply systems to ensure energy continuity during short outages. Finally, this study concludes that successful power quality management in future networks requires a multifaceted approach including continuous monitoring, network automation, and intelligent deployment of compensatory devices to ensure network reliability and stability.

Keywords: electrical power distribution system, power quality, voltage interruption, voltage sag, voltage swell

Received: 3 Jun. 2026
Revised: 26 Jun. 2026
Accepted: 15 July 2026

*** Corresponding Author:** Dr. Majid Dehghani

Citation: M. Dehghani, M. Riahinasab, A.H. Eshghi, “A review of three important power quality phenomena (voltage sag, voltage swell, and voltage interruption) in the modern electrical energy distribution system”, Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 15, no. 2, pp. 1-23, August 2026 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

مقاله مروری

مروری بر سه پدیده مهم کیفیت توان (کمبود، بیشبود و قطعی ولتاژ) در سیستم توزیع انرژی الکتریکی مدرن

مجید دهقانی[۱،۲*]، استادیار، مهدی ریاحی‌نسب[۱،۳]، استادیار، امیرحسین عشقی[۱،۲]، استادیار

۱- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، dehghani@pel.iaun.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، amh_eshghi@iau.ac.ir
۳- مرکز تحقیقات پردازش دیجیتال و بینایی ماشین، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، m.riahinasab@pel.iaun.ac.ir

چکیده: با گسترش روزافزون بارهای غیرخطی، منابع انرژی تجدیدپذیر (مانند فتوولتائیک و توربین‌های بادی) و اتوماسیون صنعتی، کیفیت توان به یکی از ارکان حیاتی پایداری و کارایی شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی مدرن تبدیل شده است. در این میان، سه پدیده اصلی ولتاژی، کمبود ولتاژ، بیشبود ولتاژ و قطعی ولتاژ، به دلیل توانایی‌شان در القای تنش‌های مخرب بر تجهیزات حساس الکترونیکی، بیشترین سهم را در حوادث کیفیت توان به خود اختصاص داده‌اند. این مقاله مروری بر ماهیت، علل بروز و پیامدهای اقتصادی و عملیاتی این سه پدیده کلیدی در بستر شبکه‌های توزیع هوشمند ارائه می‌دهد. کمبود ولتاژ که اغلب ناشی از وقوع اتصالی‌های ناگهانی است، می‌تواند منجر به تریپ کنترل‌کننده‌های صنعتی و توقف فرآیند شود، در حالی که بیشبود ولتاژ، معمولاً در اثر حذف ناگهانی بار بزرگ یا خطاهای نامتقارن رخ می‌دهد و عمر عایق‌های تجهیزات را به چالش می‌کشد. قطعی ولتاژ نیز که به معنای از دست رفتن کامل ولتاژ برای یک بازه زمانی مشخص است، به دلیل عملکرد صحیح سیستم‌های حفاظتی یا خطاهای فیزیکی، بیشترین خسارت مالی را در صنایع پیوسته ایجاد می‌کند. علاوه بر توصیف علل، این مطالعه به تحلیل راهکارهای مقابله‌ای می‌پردازد. تأکید ویژه‌ای بر استفاده از ادوات الکترونیک قدرت پیشرفته مانند جبران‌ساز دینامیکی ولتاژ برای اصلاح سریع کمبود و بیشبود، و همچنین سامانه‌های منبع تغذیه بدون وقفه برای تضمین تداوم انرژی در زمان قطعی‌های کوتاه شده است. در نهایت، این پژوهش نتیجه‌گیری می‌کند که مدیریت موفقیت‌آمیز کیفیت توان در شبکه‌های آینده، نیازمند یک رویکرد چندوجهی شامل پایش مستمر، اتوماسیون شبکه، و به‌کارگیری هوشمندانه تجهیزات جبران‌ساز برای تضمین قابلیت اطمینان و پایداری شبکه است.

کلمات کلیدی: بیشبود ولتاژ، سیستم توزیع انرژی الکتریکی، قطعی ولتاژ، کمبود ولتاژ، کیفیت توان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۳/۱۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۴/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۲۴

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر مجید دهقانی
نشانی نویسنده مسئول: واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

۱- مقدمه

صنعت برق در دهه‌های اخیر دستخوش تحولات ساختاری عمیقی شده است که گذار از شبکه‌های سنتی (متمرکز) به سمت شبکه‌های توزیع مدرن (هوشمند و غیرمتمرکز) را رقم زده است [۱،۲]. در سیستم‌های سنتی، توان الکتریکی از نیروگاه‌های بزرگ تولید و از طریق خطوط انتقال به دست مصرف‌کننده می‌رسید؛ اما در شبکه توزیع مدرن، با حضور منابع تولید پراکنده[۱] (DG) [۳] شامل انرژی‌های تجدیدپذیر [۴،۵] (بادی و خورشیدی)، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی[۲] (ESS) [۶،۷] و ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی[۳] [۸،۹]، این مدل به یک ساختار پیچیده و دوطرفه تبدیل شده است [۱۰،۱۱].

این گذار پارادایم، در کنار مزایای فراوان، چالش‌های تکنیکی قابل‌توجهی را به همراه داشته است. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، تنزل شاخص‌های کیفیت توان[۴] است. امروزه بخش بزرگی از بار مصرف‌کنندگان را تجهیزات حساس الکترونیک قدرت مانند درایوهای فرکانس متغیر[۵] (VFD)، کامپیوترها، دستگاه‌های ابزار دقیق و ربات‌های صنعتی تشکیل می‌دهند [۱۲،۱۳]. این تجهیزات برخلاف بارهای مقاومتی قدیمی، نسبت به کوچک‌ترین تغییرات دامنه، فرکانس و شکل‌موج ولتاژ بسیار حساس هستند. از سوی دیگر، افزایش نفوذ بارهای غیرخطی که جریان‌های هارمونیکی تزریق می‌کنند، در کنار ماهیت متناوب و غیرقابل‌پیش‌بینی منابع تجدیدپذیر، باعث شده است که پایداری ولتاژ شبکه به طور مستمر در معرض تهدید قرار گیرد. کیفیت توان دیگر یک مسئله صرفاً مهندسی نیست، بلکه به یک متغیر کلیدی در اقتصاد صنعتی تبدیل شده است؛ چرا که حتی یک اختلال میلی‌ثانیه‌ای در ولتاژ می‌تواند منجر به توقف خطوط تولید، خرابی داده‌ها در مراکز پردازش و خسارات مالی هنگفت در صنایع حساس شود [۱۴،۱۵]. به طور کلی از علل بروز پدیده‌های کوتاه‌مدت در شبکه‌های مدرن می‌توان به نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر (تغییرات سریع در پروفیل ولتاژ در اثر اینورترهای فتوولتائیک و توربین‌های بادی)، بارهای الکترونیک قدرت (اعوجاج و تغییرات ناگهانی بار در اثر درایوهای سرعت متغیر و یکسوکننده‌ها)، تغییر ساختار شبکه (تبیدل شبکه‌های شعاعی سنتی به شبکه‌های فعال دارای جریان‌های دوطرفه) اشاره نمود [۱۶،۱۷].

در این میان، پدیده‌های کمبود ولتاژ[۶]، بیشبود ولتاژ[۷] و قطعی ولتاژ[۸]، به دلیل نرخ وقوع بالا و تأثیر مخرب مستقیم بر تجهیزات، به عنوان بحرانی‌ترین شاخص‌های کیفیت توان شناخته می‌شوند [۱۸،۱۹]. درک علمی سازوکارهای فیزیکی بروز این حوادث، تحلیل دقیق رفتار شبکه در شرایط گذرا، و بررسی راهکارهای نوین جهت جبران‌سازی و اصلاح ولتاژ، از الزامات انکارناپذیر برای بهره‌برداران سیستم‌های توزیع مدرن محسوب می‌شود [۲۰،۲۱].

در این مطالعه با رویکردی تحلیلی، فراتر از تعاریف کلاسیکِ کیفیت توان، به واکاوی رفتار شبکه‌های توزیع مدرن در مواجهه با اختلالات ولتاژ می‌پردازد تا بستری برای مدیریت بهتر و افزایش قابلیت اطمینان[۹] در شبکه‌های توزیع آینده فراهم آورد. برجستگی اصلی این نوشتار، بررسی هم‌زمان سه پدیده حیاتی (کمبود، بیشبود و قطعی ولتاژ) در بستر شبکه‌هایی با نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر و بارهای حساس الکترونیک قدرت است. این مقاله تلاش می‌کند تا با پیوند دادن مفاهیم نظری به راهکارهای نوین مهندسی، دیدگاهی کاربردی برای طراحان و بهره‌برداران شبکه ارائه دهد. ساختار این مقاله به این شرح تنظیم شده است: در بخش دوم به منابع تولید پراکنده اشاره شده است. در بخش‌های سوم، چهارم و پنجم، ماهیت فیزیکی، علل ریشه‌ای و پیامدهای عملیاتی پدیده‌های کمبود ولتاژ، بیشبود ولتاژ و قطعی ولتاژ به صورت تفکیک‌شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ششم، راهکارهای نوین جبران‌سازی و مدیریت اختلالات ولتاژ، با تأکید بر ادوات الکترونیک قدرت و استراتژی‌های اتوماسیون شبکه، تحلیل می‌شود. در بخش هفتم چالش‌های سیستم توزیع مدرن بیان شده است. در بخش هشتم به مرور ادبیات اشاره شده است. در نهایت، بخش نهم، به جمع‌بندی یافته‌ها و ارائه چشم‌اندازی از آینده پایش و بهبود کیفیت توان در شبکه‌های هوشمند اختصاص یافته است.

۲- منابع تولید پراکنده (انرژی باد و سیستم فتوولتائیک)

انرژی باد، به‌عنوان یکی از بالغ‌ترین و در دسترس‌ترین منابع تجدیدپذیر، نقشی کلیدی در گذار انرژی[۱۰] و کربن‌زدایی از شبکه ایفا می‌کند. این فناوری با تبدیل انرژی جنبشی توده‌های هوا به انرژی مکانیکی و در نهایت تولید توان الکتریکی، راهکاری پاک و مقیاس‌پذیر برای تأمین تقاضای انرژی است. از دیدگاه مهندسی قدرت، سیستم تبدیل انرژی باد[۱۱] (WECS) با بهره‌گیری از

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

ژنراتورهای مدرن مانند ژنراتور القایی از دوسو تغذیه[۱۲] (DFIG) و ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم[۱۳] (PMSG) و مبدل‌های پیشرفته الکترونیک قدرت، امکان بهره‌برداری در سرعت‌های متغیر و استخراج حداکثری توان را فراهم کرده‌اند [۲۲،۲۳]. با این حال، به دلیل ماهیت تصادفی و غیرقابل‌پیش‌بینی باد، ادغام آن در مقیاس بالا با شبکه، چالش‌هایی نظیر نوسانات توان، کاهش اینرسی سیستم و مسائل پایداری ولتاژ در زمان خطا را به همراه دارد. امروزه، تحقیقات در این حوزه نه تنها بر ارتقای راندمان توربین‌ها، بلکه بر هوشمندسازی شبکه، توسعه کدهای شبکه سخت‌گیرانه‌تر و ادغام سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی جهت بهبود کیفیت توان و جبران نوسانات متمرکز است. در نهایت، انرژی باد با پیشرفت در فناوری‌های کنترل و دیجیتالی‌سازی، به یکی از ارکان اصلی شبکه‌های هوشمند و سیستم‌های پایدار آینده تبدیل شده است [۲۴،۲۵].

انرژی خورشیدی یکی از مهم‌ترین و پاک‌ترین منابع تجدیدپذیر است که با تبدیل مستقیم نور خورشید به برق از طریق سلول‌های فتوولتائیک تولید می‌شود. این فناوری به دلیل ماهیت بدون قطعه متحرک، قابلیت اطمینان بالا، نگهداری ساده و امکان نصب در مقیاس‌های مختلف به سرعت در حال گسترش است. در سیستم‌های فتوولتائیک، توان خروجی به شدت تحت تأثیر شدت تابش و دمای محیط قرار دارد؛ به همین دلیل، به‌کارگیری اینورترهای هوشمند و الگوریتم‌های ردیابی نقطه حداکثر توان[۱۴] (MPPT) برای استخراج بیشترین توان از پنل‌ها ضروری است. هرچند نوسانات تابش باعث تغییرات لحظه‌ای توان می‌شود، اما ترکیب این فناوری با سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و کنترل پیشرفته، امکان پایداری بیشتر و ادغام مؤثر در شبکه قدرت را فراهم می‌کند. به طور کلی، انرژی خورشیدی با کاهش هزینه تجهیزات، افزایش راندمان سلول‌ها و نقش کلیدی در شبکه‌های هوشمند، یکی از پایه‌ای‌ترین راهکارهای تأمین انرژی پاک در آینده به شمار می‌رود [۲۶،۲۷].

در جدول (۱) مقایسه‌ای فنی و کاربردی بین انرژی خورشیدی (فتوولتائیک) و انرژی بادی ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود انرژی خورشیدی برای تولید پراکنده و مقیاس کوچک تا متوسط مناسب‌تر است و انرژی بادی در مقیاس نیروگاهی و تولید توان بالا اقتصادی‌تر است. ترکیب این دو منبع در قالب سیستم‌های هیبریدی می‌تواند نوسانات تولید را کاهش داده و قابلیت اطمینان شبکه را افزایش دهد.

Table (1): Technical and practical comparison between solar energy and wind energy

جدول (۱): مقایسه فنی و کاربردی بین انرژی خورشیدی و انرژی بادی

شاخص	انرژی خورشیدی	انرژی بادی
منبع انرژی	تابش خورشید	انرژی جنبشی باد
نوع تبدیل انرژی	مستقیم	غیرمستقیم
اجزای اصلی	پنل فتوولتائیک اینورتر، سازه نصب	توربین، ژنراتور، گیربکس، مبدل قدرت
قطعات متحرک	ندارد	دارد (پره‌ها، شفت، گیربکس)
هزینه نگهداری	کم	متوسط تا بالا
وابستگی به شرایط محیطی	وابسته به شدت تابش و دما	وابسته به سرعت و پایداری باد
چگالی توان	نسبتاً پایین (نیاز به سطح وسیع)	بالاتر نسبت به فتوولتائیک
بازده عملیاتی معمول	حدود ۱۸ تا ۲۲ درصد	ضریب توان آیرودینامیکی ۴۵ تا ۵۰ درصد
نوسانات توان خروجی	بالا (ابر، تغییرات تابش)	متوسط تا بالا (تغییرات سرعت باد)
اینرسی ذاتی	ندارد	دارای اینرسی مکانیکی
مقیاس کاربرد	خانگی تا نیروگاهی	عمدتاً نیروگاهی (خشکی و دریایی)
چالش‌های شبکه	نوسان ولتاژ، هارمونیک اینورتر	پایداری فرکانس، گذر از خطا، فلیکر
مزیت اصلی	سادگی، نصب ماژولار، صدای صفر	توان بالا و تولید بیشتر در مقیاس بزرگ
محدودیت اصلی	تولید فقط در روز	نیاز به شرایط باد مناسب

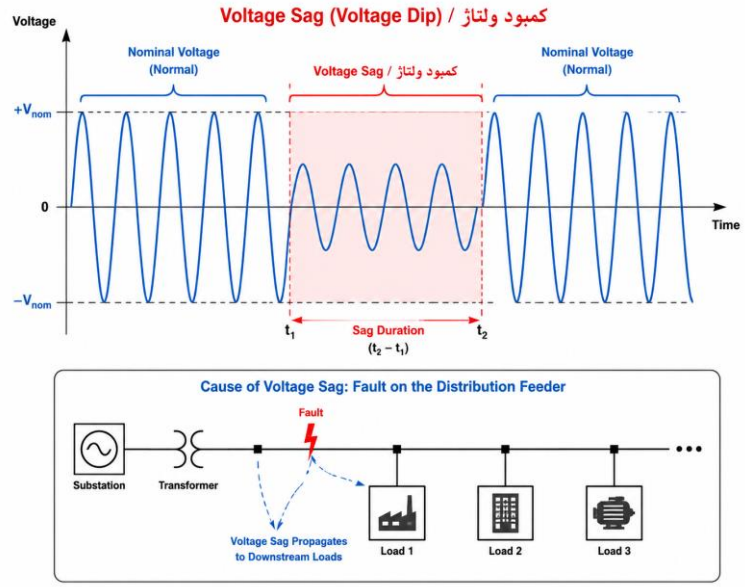
۳- کمبود ولتاژ

کمبود ولتاژ کاهش موقت مقدار مؤثر ولتاژ به مقداری بین ۰/۱ تا ۰/۹ ولتاژ نامی (پریونیت) است که مدت زمان آن معمولاً بین نیم‌سیکل تا یک دقیقه به طول می‌انجامد. علل بروز آن وقوع اتصالی[۱۵] در خطوط انتقال یا توزیع (شایع‌ترین علت)، راه‌اندازی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

موتورهای الکتریکی بزرگ با جریان‌های هجومی بالا و شروع به کار بارهای سنگین در سیستم‌های صنعتی می‌تواند باشد. از پیامدها در اثر وقوع کمبود ولتاژ می‌توان به تریپ خوردن درایوهای فرکانس متغیر، خاموش شدن کامپیوترها، اختلال در عملکرد رله‌های حفاظتی و ریست شدن کنترلرهای حساس اشاره نمود [۲۸،۲۹].

شکل (۱) رفتار دینامیکی یک سیستم قدرت را در مواجهه با پدیده کمبود ولتاژ در سه مرحله مشخص به تصویر می‌کشد. حالت پایدار[۱۶] در بازه زمانی پیش از وقوع حادثه است که دامنه ولتاژ در سطح نامی (۱ پریونیت) قرار دارد که نشان‌دهنده عملکرد عادی شبکه است. در مرحله وقوع کمبود[۱۷] با وقوع یک خطای خارجی (مانند اتصالی در خطوط انتقال یا جریان هجومی موتورهای بزرگ)، دامنه ولتاژ به صورت ناگهانی کاهش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود، افت دامنه به مقداری کمتر از سطح نامی (به محدوده بین ۰/۱ تا ۰/۹ پریونیت) مشهود است. در مرحله بازیابی[۱۸] پس از ایزوله‌سازی خطا توسط سیستم‌های حفاظتی، دامنه ولتاژ مجدداً به مقدار نامی بازمی‌گردد. این نمودار به خوبی ماهیت گذارای این پدیده را نشان می‌دهد، به عبارت دیگر برخلاف قطعی ولتاژ، این اختلال منجر به از دست رفتن کامل جریان برق نشده، بلکه تنها کیفیت توان را در یک بازه زمانی محدود (از چند میلی‌ثانیه تا چند ثانیه) تحت تأثیر قرار می‌دهد.



شکل (۱): نمودار زمانی کمبود ولتاژ، نمایش کاهش ناگهانی دامنه ولتاژ و بازگشت آن به مقدار نامی پس از رفع خطا

Figure (1): Voltage sag time graph, showing a sudden decrease in voltage amplitude and its return to the nominal value after the fault is cleared.

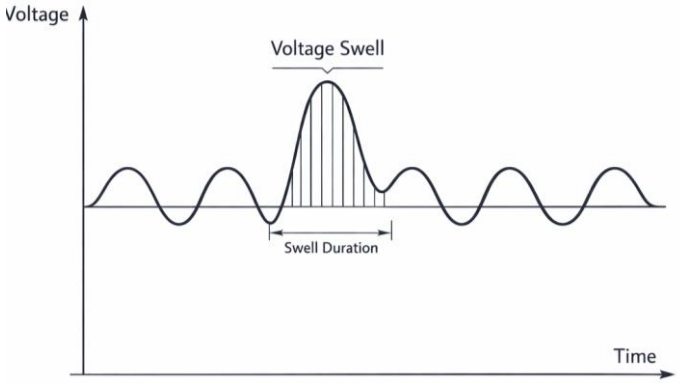
۴- بیشبود ولتاژ

بیشبود ولتاژ، افزایش موقت مقدار مؤثر ولتاژ بین ۱/۱ تا ۱/۸ برابر ولتاژ نامی است که معمولاً به دلیل عدم تعادل در فازها یا کلیدزنی بارهای بزرگ رخ می‌دهد. علل بروز این پدیده می‌تواند قطع ناگهانی یک بار بزرگ[۱۹]، وقوع اتصالی‌های تک‌فاز به زمین در سیستم‌های دارای سیستم زمین غیرمؤثر (که باعث افزایش ولتاژ در فازهای سالم می‌شود) و تغییرات شدید در تولیدات پراکنده (مثل تغییر لحظه‌ای تابش خورشیدی در نیروگاه‌های فتوولتائیک متصل به شبکه) باشد. تنش دی‌الکتریک بر روی عایق کابل‌ها و ترانسفورماتورها، سوختن لامپ‌ها، آسیب به بردهای الکترونیکی حساس و کاهش عمر مفید تجهیزات قدرت از پیامدهای وقوع بیشبود ولتاژ است [۳۰،۳۱].

شکل (۲) رفتار ولتاژ در حالت بیشبود را نشان می‌دهد. در ابتدا ولتاژ در مقدار نامی قرار دارد، سپس به‌دنبال رخدادهایی مانند قطع ناگهانی بار بزرگ، خطای تک‌فاز به زمین یا تغییرات شدید تولید پراکنده، دامنه ولتاژ به‌طور موقت از مقدار نامی فراتر می‌رود. پس از رفع عامل اختلال، ولتاژ دوباره به سطح عادی بازمی‌گردد. تحلیل رخداد بیشبود ولتاژ در شبکه توزیع در شکل (۳) نشان داده شده است، که در آن نمودار تک‌خطی سیستم شامل منبع تغذیه، المان حفاظتی و بروز خطا در یکی از فازها

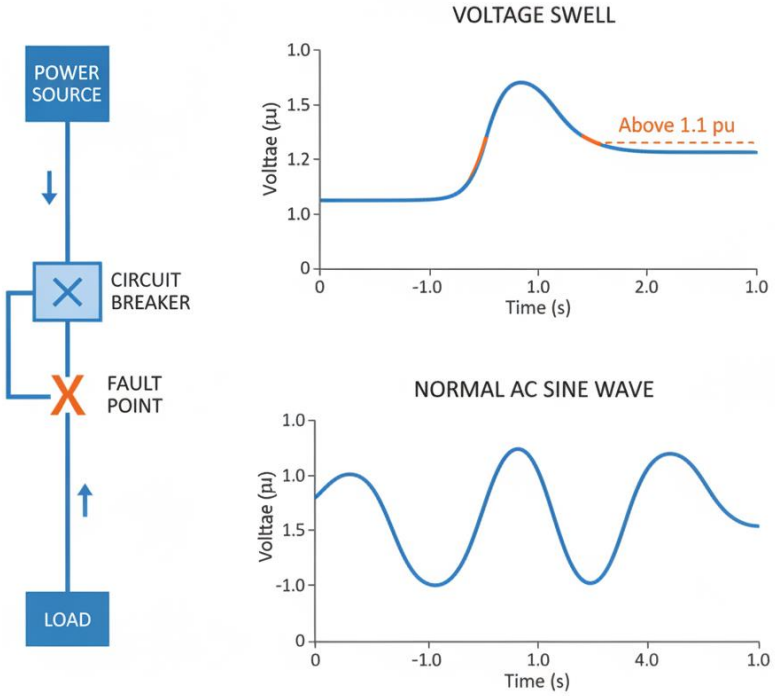
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

(خطای نامتقارن) و نمودار پاسخ زمانی ولتاژ بار که افزایش ناگهانی دامنه را در فازهای سالم در پاسخ به خطای فاز به زمین نمایش داده شده‌اند.



شکل (۲): نمودار زمانی بیشبود ولتاژ، افزایش موقت دامنه ولتاژ بالاتر از مقدار نامی و بازگشت آن به حالت پایدار

Figure (2): Time diagram of voltage swell, temporary increase in voltage amplitude above the nominal value and its return to a stable state



شکل (۳): تحلیل رخداد بیشبود ولتاژ در شبکه توزیع. (الف) نمودار تک‌خطی سیستم، (ب) نمودار پاسخ زمانی ولتاژ بار

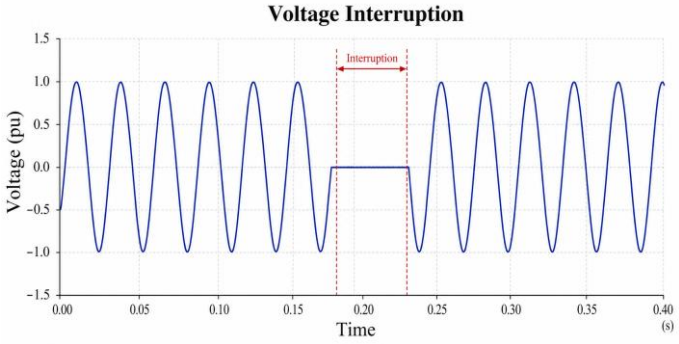
Figure (2): Analysis of overvoltage events in the distribution network. (a) Single-line diagram of the system, (b) Load voltage time response diagram

۵- قطعی ولتاژ

قطعی ولتاژ به معنای کاهش مقدار ولتاژ به کمتر از ۰/۱ ولتاژ نامی است. این پدیده بر اساس مدت زمان آن به دو دسته کوتاه‌مدت (تا ۱ دقیقه) و طولانی‌مدت (بیش از ۱ دقیقه یا پایدار) تقسیم می‌شود. علل بروز آن می‌تواند عملکرد تجهیزات حفاظتی (مانند فیوزها و کلیدها) برای ایزوله کردن بخش خطادار، صدمات فیزیکی به تجهیزات شبکه (مانند برخورد درخت با خطوط یا خرابی کابل‌های زیرزمینی) و خطاهای انسانی در عملیات سوییچینگ باشد. از پیامدهای رخ دادن قطعی ولتاژ می‌توان به توقف کامل فرآیندهای تولید، ضررهای مالی سنگین در صنایع پیوسته (مانند پتروشیمی و نیمه‌هادی‌ها)، و نیاز به استارت مجدد سیستم‌ها با فرآیندی زمان‌بر و هزینه‌بر اشاره نمود. شکل (۴) پدیده قطعی ولتاژ را نشان می‌دهد که در آن مقدار مؤثر ولتاژ به کمتر از ۰/۱ پریونیت و در بسیاری موارد به نزدیک صفر می‌رسد. این وضعیت معمولاً در اثر عملکرد

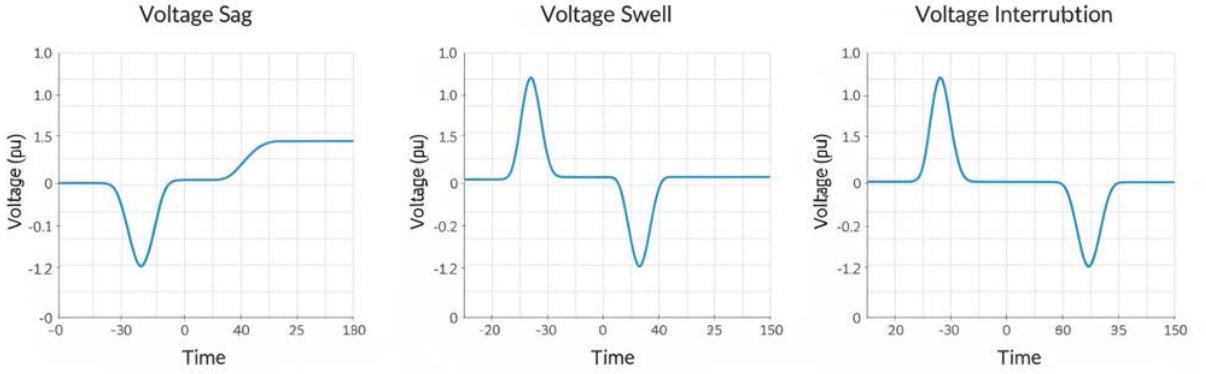
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

تجهیزات حفاظتی، بروز خطا در شبکه، آسیب فیزیکی به خطوط یا تجهیزات، و یا عملیات کلیدزنی رخ می‌دهد. پس از حذف یا ایزوله شدن خطا، ولتاژ مجدداً به سطح نامی بازمی‌گردد. این پدیده در مقایسه با کمبود ولتاژ شدیدتر است و می‌تواند موجب توقف کامل عملکرد بارهای حساس و تجهیزات صنعتی شود. شکل (۵) تغییرات ولتاژ برای سه پدیده فوق را به طور همزمان نشان می‌دهد.



شکل (۴): نمودار زمانی قطعی ولتاژ و بازگشت ولتاژ به حالت نامی پس از رفع خطا

Figure (3): Time diagram of voltage failure and voltage return to nominal state after fault clearance



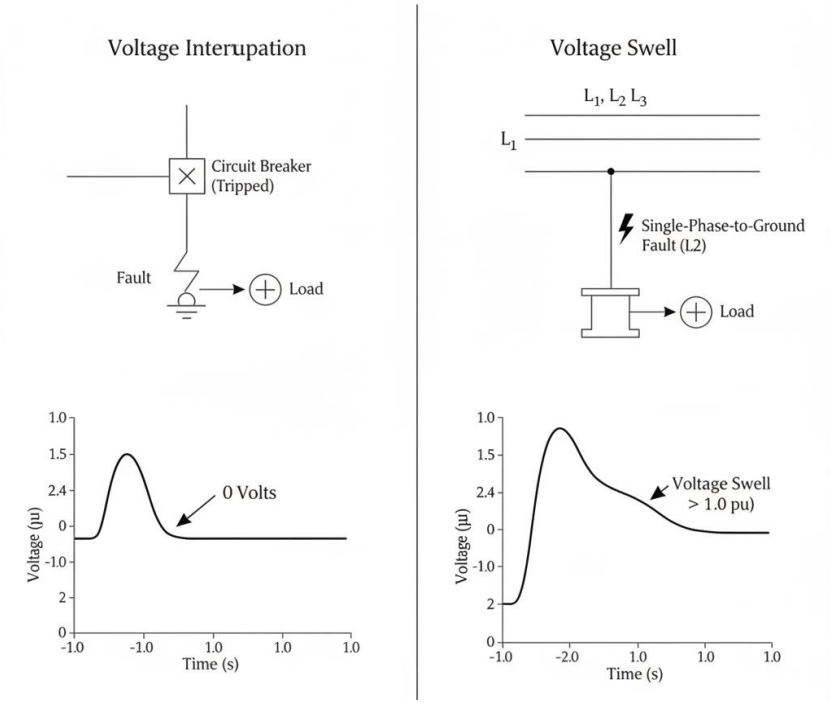
شکل (۵): مقایسه سه پدیده اصلی کیفیت توان (کمبود ولتاژ، بیشبود ولتاژ و قطعی ولتاژ) در حوزه زمان

Figure (4): Comparison of the three main power quality phenomena (voltage sag, voltage swell, and voltage interruption) in the time domain

برای نشان دادن مقایسه‌ای دقیق میان دو پدیده قطعی ولتاژ و بیشبود ولتاژ، شکل (۶) این دو حالت را در کنار هم نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تفاوت نبودن کامل ولتاژ (به دلیل قطع حفاظتی) با افزایش ناگهانی ولتاژ (به دلیل خطاهای نامتقارن یا سوئیچینگ) به وضوح مشخص شده است.

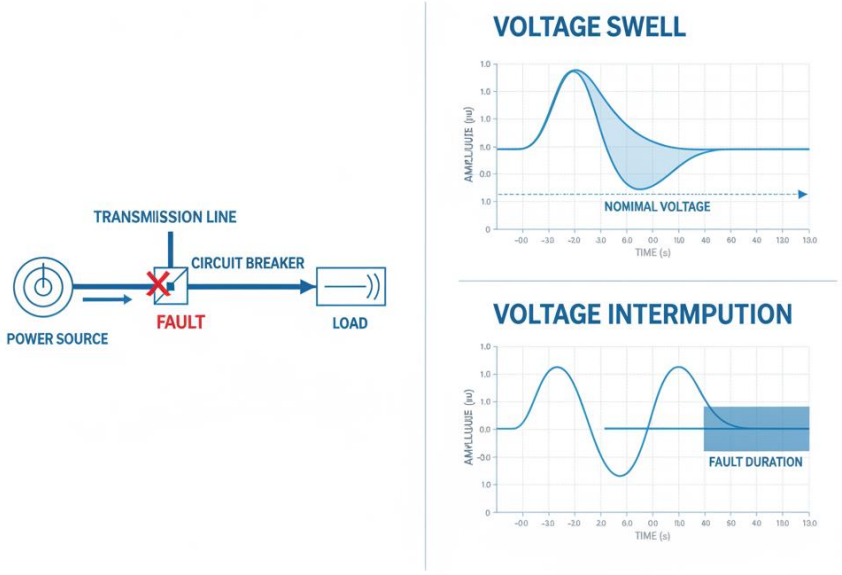
شکل (۷) تفاوت بنیادین بین قطعی ولتاژ و بیشبود ولتاژ را از منظر رفتار شبکه توزیع نشان می‌دهد. برخلاف قطعی ولتاژ که ناشی از قطع جریان توسط تجهیز حفاظتی است، بیشبود ولتاژ معمولاً در اثر خطاهای نامتقارن (مثل خطای فاز به زمین) در سایر فازها یا سوئیچینگ (قطع و وصل) بانک‌های خازنی بزرگ یا بارهای موتوری حجیم رخ می‌دهد. در نمودار زمان، مشاهده می‌شود که با وقوع خطا در یک فاز، ولتاژ در فازهای سالم سیستم به طور موقت افزایش می‌یابد. این افزایش معمولاً بین ۱/۱ تا ۱/۸ برابر مقدار نامی بوده و مدت زمان آن بسیار کوتاه است. در حالی که در قطعی، جریان قطع می‌شود، در بیشبود، ولتاژ همچنان برقرار است اما فراتر از حد مجاز است. بیشبود ولتاژ می‌تواند باعث استرس عایقی در تجهیزات شود. اگر بیشبود برای مدت زمان طولانی ادامه یابد (یا شدت آن زیاد باشد)، می‌تواند منجر به شکست عایقی ترانسفورماتورها، سوختن لامپ‌ها یا خرابی منابع تغذیه حساس در تجهیزات الکترونیک قدرت شود. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که چگونه سیستم توزیع به عنوان یک شبکه به هم پیوسته عمل می‌کند؛ به این معنا که وقوع یک خطا در بخشی از شبکه، لزوماً به معنی قطع برق در همه جا نیست، بلکه می‌تواند باعث ایجاد اختلالات کیفی در سایر نقاط شبکه شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]



شکل (۶): تفاوت بین قطعی ولتاژ و بیشبود ولتاژ

Figure (7): Difference between voltage interruption and overvoltage



شکل (۷): تفاوت بنیادین بین قطعی ولتاژ و بیشبود ولتاژ از منظر رفتار شبکه توزیع

Figure (2): Fundamental difference between voltage interruption and overvoltage from the perspective of distribution network behavior

به طور خلاصه پدیده‌های کمبود، بیشبود و قطعی ولتاژ، چالش‌های جدایی‌ناپذیر سیستم‌های توزیع هستند. با این حال، در عصر انرژی‌های نو، شناسایی دقیق ریشه این اختلالات و استفاده از سیستم‌های مانیتورینگ آنلاین کیفیت توان، اولین گام برای رسیدن به یک شبکه پایدار و قابل اطمینان است. درک عمیق از این رفتارها به مهندسان اجازه می‌دهد تا سیستم‌هایی مقاوم‌تر در برابر نوسانات طراحی کرده و هزینه‌های عملیاتی را به شکل چشمگیری کاهش دهند. همچنین خلاصه‌ای از تفاوت-های اصلی این سه پدیده در جدول (۲) آمده است. بر اساس استاندارد IEEE 1159، این سه پدیده بر اساس دامنه و مدت زمان طبقه‌بندی می‌شوند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

Table (2): Comparison between three important power quality phenomena in the electrical energy distribution system

جدول (۲): مقایسه بین سه پدیده مهم کیفیت توان در سیستم توزیع انرژی الکتریکی

عامل اصلی	مدت زمان معمول	سطح ولتاژ (پریونیت)	اثر بر تجهیزات	پدیده
اتصالی در شبکه	۰/۵ سیکل الی یک دقیقه	۰/۱ الی ۰/۹	ریست شدن PLCها و سیستم‌های حساس	کمبود ولتاژ
حذف بار/اتصال نامتقارن	۰/۵ سیکل الی یک دقیقه	۱/۱ الی ۱/۸	استرس عایقی، داغ شدن ترانس‌ها، سوختن لامپ‌ها	بیشبود ولتاژ
عملکرد حفاظت/خرابیتجهیزات	متنوع	کمتر از ۰/۱	توقف کامل فرآیند	قطعی ولتاژ

۶- تحلیل راهکارهای مقابله با کمبود، بیشبود و قطعی ولتاژ

مقابله با پدیده‌های کیفیت توان در سیستم‌های توزیع مدرن، نیازمند ترکیبی از راهکارهای پیشگیرانه، اصلاحی و جبرانی است [۳۲،۳۳].. از آنجا که کمبود، بیشبود و قطعی ولتاژ معمولاً ماهیت گذرا دارند و در بازه‌های زمانی بسیار کوتاه رخ می‌دهند، راهکارهای مقابله با آن‌ها باید از سرعت پاسخ بالا، دقت کنترلی مناسب و قابلیت سازگاری با شرایط متغیر شبکه برخوردار باشند. در سال‌های اخیر، توسعه ادوات الکترونیک قدرت و سامانه‌های کنترلی پیشرفته، امکان اعمال جبران‌سازی سریع و مؤثر را فراهم کرده است [۳۴،۳۵].

۶-۱- سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی

نقش سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی (ESS) در شبکه‌های توزیع مدرن، فراتر از صرفاً ذخیره برق است؛ آن‌ها به عنوان ضربه-گیر ولتاژ عمل می‌کنند [۳۶،۳۷]. برای مقابله با قطعی ولتاژ، یکی از متداول‌ترین راهکارها استفاده از منابع تغذیه بدون وقفه یا UPS است. این سامانه‌ها با بهره‌گیری از باتری، ابرخازن یا سایر منابع ذخیره انرژی، توان الکتریکی را در زمان قطع برق تأمین می‌کنند. UPS به‌ویژه برای بارهای حیاتی که حتی چند میلی‌ثانیه خاموشی نیز برای آن‌ها غیرقابل‌قبول است، مانند سرورها، تجهیزات مخابراتی، سیستم‌های کنترل فرآیند و اتاق‌های عمل، بسیار ضروری است [۳۸،۳۹]. با وجود مزایای فراوان، UPS نیز محدودیت‌هایی دارد؛ از جمله هزینه نصب و نگهداری بالا، محدودیت زمان پشتیبانی، و نیاز به مدیریت مناسب باتری‌ها. از این‌رو، در طراحی شبکه‌های مدرن، UPS معمولاً به‌عنوان یک راهکار مکمل در کنار سایر روش‌های پایدارسازی ولتاژ به‌کار گرفته می‌شود.

هنگامی که شبکه اصلی به دلیل خطا یا حادثه قطع می‌شود، سیستم ذخیره‌ساز با تغییر وضعیت به حالت جزیره‌ای (در کمتر از چند میلی‌ثانیه سوئیچ استاتیک شبکه اصلی را جدا کرده و ذخیره‌ساز به عنوان شینه مرجع عمل می‌کند تا بار اصلاً متوجه قطعی نشود) و یا بر خلاف دیزل ژنراتورها که نیاز به زمان برای استارت دارند، سیستم‌های مبتنی بر باتری یا ابرخازن‌ها به صورت آنی انرژی تزریق می‌کنند)، از بار محافظت می‌کند [۴۰]. پدیده‌های گذرا (مانند نوسانات ناشی از رعد و برق یا سوئیچینگ‌های شدید) دارای انرژی بالا در زمان بسیار کوتاه هستند. ذخیره‌سازها با دو رویکرد با آن‌ها مقابله می‌کنند که عبارتند از: (الف) صاف کردن منحنی توان[۲۰]: ذخیره‌ساز مانند یک فیلتر پایین‌گذر عمل کرده و جهش‌های ناگهانی ولتاژ را جذب می‌کند، و (ب) جبران‌سازی لحظه‌ای: در لحظه وقوع یک گذرا که ممکن است باعث عملکرد اشتباه رله‌ها شود، ذخیره‌ساز با جذب یا تزریق توان اکتیو/راکتیو، شکل موج را پایدار نگه می‌دارد.

۶-۲- تجهیزات مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت

در سیستم‌های توزیع الکتریکی مدرن، مخصوصاً با حضور بارهای حساس، منابع تجدیدپذیر، شارژرهای خودرو برقی، درایوهای سرعت متغیر و بارهای غیرخطی، کیفیت توان اهمیت زیادی دارد [۴۱،۴۲]. سه تجهیز مهم مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت برای بهبود کیفیت توان عبارت‌اند از: بازیاب دینامیکی ولتاژ[۲۱] (DVR) [۴۳،۴۴]، جبران‌ساز استاتیکی سنکرون توزیع[۲۲] (DSTATCOM) [۴۵،۴۶] و بهبوددهنده یکپارچه کیفیت توان[۲۳] (UPQC) [۴۷]. هر سه از خانواده ادوات توان سفارشی[۲۴]

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

هستند، اما محل نصب، نوع اتصال، مسئله‌ای که حل می‌کنند و سطح پیچیدگی آن‌ها متفاوت است [۴۸،۴۹]. مشخصات این تجهیزات در جدول‌های (۳) و (۴) مقایسه شده‌اند.

در سیستم توزیع مدرن، کیفیت توان تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند تولید پراکنده خورشیدی و بادی، اینورترها و مبدل‌های الکترونیک قدرت، شارژرهای سریع خودرو برقی، بارهای غیرخطی، تغییرات سریع بار، ریزشبکه‌ها، ذخیره‌سازهای انرژی، بارهای حساس دیجیتال و صنعتی قرار می‌گیردند، در چنین شبکه‌ای، DVR برای حفاظت نقطه‌ای از بارهای حساس بسیار مفید است [۵۰،۵۱]. مثلاً اگر یک کارخانه نیمه‌هادی یا مرکز داده در انتهای یک فیدر توزیع قرار داشته باشد، DVR می‌تواند از آن در برابر افت ولتاژ ناشی از خطاهای کوتاه‌مدت یا راه‌اندازی موتورهای بزرگ محافظت کند. اما DVR اثر محدودی روی کیفیت جریان کل فیدر دارد. D-STATCOM برای مدیریت ولتاژ شین و توان راکتیو در شبکه‌هایی با تولید پراکنده بسیار ارزشمند است. مثلاً در شبکه‌ای با نیروگاه خورشیدی، تغییر تابش می‌تواند موجب نوسان ولتاژ شود. D-STATCOM می‌تواند با تزریق یا جذب توان راکتیو، ولتاژ را پایدارتر کند. همچنین برای جبران جریان‌های هارمونیکی ناشی از بارهای غیرخطی مناسب است. UPQC گزینه‌ای پیشرفته برای شبکه‌هایی است که هم‌زمان با مشکلات ولتاژ و جریان روبه‌رو هستند. در ریزشبکه‌ها، پارک‌های صنعتی، مراکز داده بزرگ و شبکه‌های دارای بارهای بسیار حساس، UPQC می‌تواند کیفیت توان را در سطح بالایی تضمین کند.

Table (3): Comparison in terms of power quality problems

جدول (۳): مقایسه از نظر مشکلات کیفیت توان

بهبوددهنده یکپارچه کیفیت توان	جبران‌ساز استاتیکی سنکرون توزیع	بازیاب دینامیکی ولتاژ	مشکل کیفیت توان
بسیار خوب	متوسط تا خوب	بسیار خوب	کمبود ولتاژ
بسیار خوب	متوسط	بسیار خوب	بیشبود ولتاژ
بسیار خوب	بسیار خوب	محدود	اصلاح ضریب توان
بسیار خوب	محدود	خوب	هارمونیک ولتاژ
بسیار خوب	خوب	خوب	فیلکر ولتاژ

Table (4): Performance comparison of power quality improvement equipment

جدول (۴): مقایسه عملکرد تجهیزات بهبود کیفیت توان

بهبوددهنده یکپارچه کیفیت توان	جبران‌ساز استاتیکی سنکرون توزیع	بازیاب دینامیکی ولتاژ	معیار مقایسه
جامع‌ترین راهکار، جبران هم‌زمان ولتاژ و جریان، مناسب برای شبکه‌های حساس و مدرن	اصلاح ضریب توان، جبران توان راکتیو، کاهش هارمونیک جریان، پشتیبانی ولتاژ شین	جبران بسیار خوب افت و افزایش ولتاژ، حفاظت عالی بار حساس، پاسخ سریع	مزایا
هزینه زیاد، کنترل پیچیده، تجهیزات بیشتر، نیاز به طراحی دقیق لینک DC و حفاظت	جبران محدود مشکلات سری ولتاژ، حفاظت کمتر از بار در برابر افت ولتاژ شدید	جبران محدود جریان، وابستگی به ذخیره انرژی در افت‌های عمیق، اثر کمتر روی ضریب توان	معایب
جبران هم‌زمان ولتاژ و جریان	جبران جریان و توان راکتیو	جبران ولتاژ	تمرکز اصلی
راهکار جامع برای کیفیت توان در شبکه‌های توزیع مدرن	اصلاح ضریب توان، کاهش هارمونیک جریان و پشتیبانی ولتاژ	حفاظت بار حساس در برابر افت/افزایش ولتاژ	بهترین کاربرد
سری+موازی	موازی با شین	سری با خط	نوع اتصال
هم ولتاژ سمت بار، هم جریان سمت شبکه	جریان، توان راکتیو و ولتاژ شین	ولتاژ سمت بار	محل اثرگذاری اصلی
متوسط تا زیاد	متوسط	متوسط	پیچیدگی کنترل
زیاد	متوسط	متوسط	هزینه اولیه

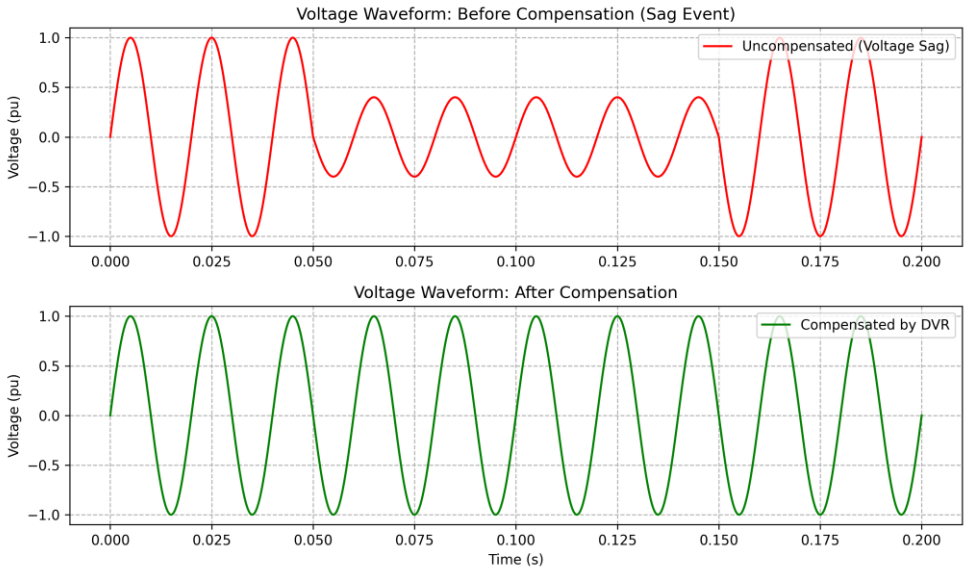
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

۱-۲-۶- بازیابی دینامیکی ولتاژ

یکی از مهم‌ترین و مؤثرترین تجهیزات برای مقابله با کمبود و بیشبود ولتاژ، جبران‌ساز دینامیکی ولتاژ یا DVR است. این تجهیز به‌صورت سری در مسیر تغذیه بار حساس قرار می‌گیرد و با تزریق ولتاژی مناسب، افت یا افزایش ولتاژ شبکه را جبران می‌کند. DVR به دلیل زمان پاسخ بسیار کوتاه و توانایی حفظ ولتاژ بار در محدوده مجاز، برای صنایع دارای بارهای حساس، مانند خطوط تولید نیمه‌هادی، کارخانه‌های داروسازی، مراکز داده و تجهیزات پزشکی، اهمیت ویژه‌ای دارد. مزیت اصلی DVR در این است که می‌تواند بدون نیاز به قطع بار، ولتاژ سمت مصرف‌کننده را در سطح مطلوب نگه دارد. با این حال، این تجهیز در برابر قطعی‌های طولانی‌مدت کافی نیست، زیرا انرژی موردنیاز آن معمولاً از ذخیره‌سازها یا منبع پشتیبان تأمین می‌شود و ظرفیت آن محدود است. DVR ولتاژی را به صورت سری تزریق می‌کند [۵۲،۵۳]:

$$V_{load}=V_{source}+V_{DVR} \quad (۱)$$

اگر ولتاژ شبکه دچار افت شود، DVR ولتاژ کمبود را تزریق می‌کند تا ولتاژ بار ثابت بماند. به عبارت دیگر اگر ولتاژ منبع از مقدار نامی به ۷۰ درصد کاهش یابد، DVR می‌تواند ۳۰ درصد باقی‌مانده را تزریق کند تا بار همچنان ولتاژ نزدیک به مقدار نامی ببیند. عدم حل مشکلات جریان بار به طور مستقیم توسط DVR از محدودیت‌های آن به حساب می‌آید. اگر بار غیرخطی باشد و جریان هارمونیکی بکشد، DVR به‌تنهایی جریان سمت شبکه را کاملاً پاک نمی‌کند. در شکل (۸)، پدیده کمبود ولتاژ شبیه‌سازی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، DVR با تزریق ولتاژ مورد نیاز، ولتاژ بار را در سطح یک پریونیت ثابت نگه داشته است.



شکل (۸): نمایش یک خطای کمبود ولتاژ شدید و نحوه بازسازی آن به شکل موج سینوسی کامل.

Figure (8): Representation of a severe undervoltage fault and how it is reconstructed into a perfect sine wave.

۲-۲-۶- جبران‌ساز استاتیکی سنکرون توزیع

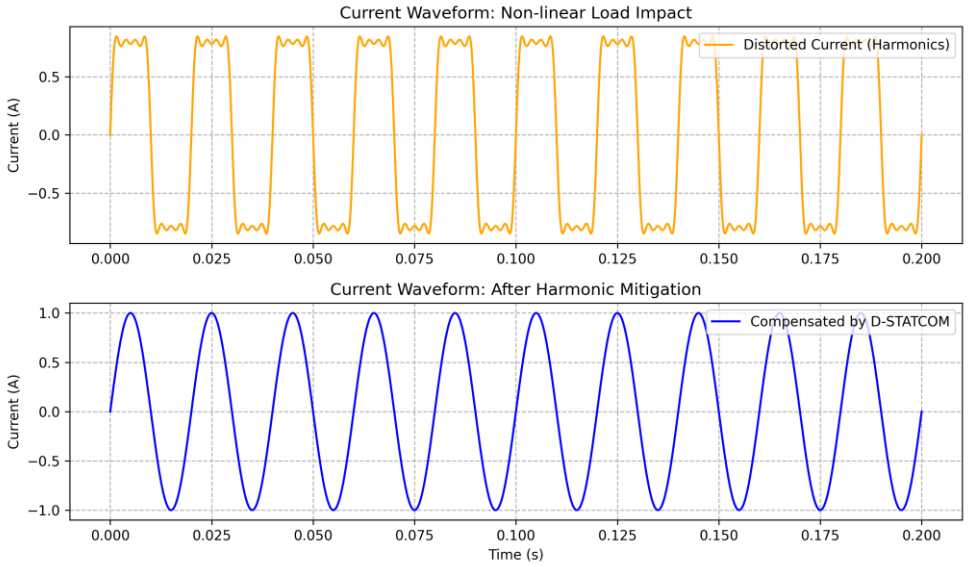
D-STATCOM جریان کنترلی به شبکه تزریق می‌کند:

$$I_{source}=I_{load}-I_{DSTATCOM} \quad (۲)$$

اگر بار توان راکتیو مصرف کند، D-STATCOM جریان راکتیو لازم را تأمین می‌کند تا شبکه جریان کمتری بکشد و ضریب توان بهتر شود. اگر بار غیرخطی باشد، D-STATCOM می‌تواند مؤلفه‌های هارمونیکی جریان بار را جبران کند تا جریان سمت شبکه سینوسی‌تر شود. D-STATCOM چون به صورت شنت متصل است، در جبران افت ولتاژ شدید در مسیر تغذیه بار حساس به اندازه DVR مؤثر نیست. یعنی اگر مشکل اصلی ولتاژ سری خط باشد، D-STATCOM همیشه بهترین انتخاب

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

نیست. در شکل (۹)، اثر بارهای غیرخطی (مانند یکسوسازها و شارژرهای EV) نمایش داده شده است. D-STATCOM با حذف هارمونیک‌ها، جریان اعوجاج یافته را به یک شکل موج سینوسی پاک تبدیل کرده است.



شکل (۹): اثر بارهای غیرخطی در جریان. نمایش جریان غیرخطی (حاوی هارمونیک‌های مرتبه بالا) و تبدیل آن به جریان کاملاً سینوسی پس از فیلتراسیون فعال.

۳-۲-۶- بهبوددهنده یکپارچه کیفیت توان

برخلاف سایر تجهیزات که یا سری هستند و یا موازی، در UPQC یک مبدل ولتاژ سری برای اصلاح ولتاژ و یک مبدل موازی برای اصلاح جریان (هارمونیک‌ها و عدم تعادل) به کار گرفته شده است. این یعنی خروجی بار نه تنها از نظر ولتاژ ایده‌آل است، بلکه جریان کشیده شده از منبع نیز سینوسی و متعادل خواهد بود. UPQC می‌تواند به طور همزمان ولتاژ تغذیه را برای بار حساس تصحیح کند و همزمان جریان‌های هارمونیکی که توسط بارهای غیرخطی تولید شده‌اند را فیلتر کند. UPQC دو مبدل دارد که شامل یک مبدل سری برای جبران مشکلات ولتاژ، مشابه DVR و یک مبدل شنت برای جبران مشکلات جریان، مشابه D-STATCOM است [۵۴،۵۵]. روابط کلی آن را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$V_{load}=V_{source}+V_{series} \quad (۳)$$

$$I_{source}=I_{load}-I_{shunt} \quad (۴)$$

بنابراین UPQC می‌تواند ولتاژ بار را سینوسی و ثابت نگه دارد و همزمان جریان کشیده‌شده از شبکه را نیز سینوسی، متعادل و با ضریب توان نزدیک به یک کند. UPQC گران‌تر، پیچیده‌تر و نیازمند کنترل پیشرفته‌تر است. همچنین طراحی لینک DC، هماهنگی دو مبدل، حفاظت و قابلیت اطمینان آن نسبت به DVR و D-STATCOM چالش‌برانگیزتر است [۵۶،۵۷]. از نظر اقتصادی، اگر مشکل اصلی افت ولتاژ برای بار حساس باشد، DVR اقتصادی‌تر از UPQC است. اگر مشکل اصلی توان راکتیو، ضریب توان و هارمونیک جریان باشد، D-STATCOM مناسب‌تر است. با وجود قدرت خیره‌کننده، دلیل اینکه از UPQC در همه جا استفاده نمی‌شود، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بسیار بالا و پیچیدگی بالای الگوریتم‌های کنترلی آن نسبت به DVR یا D-STATCOM به تنهایی است.

۷- چالش‌های سیستم مدرن

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

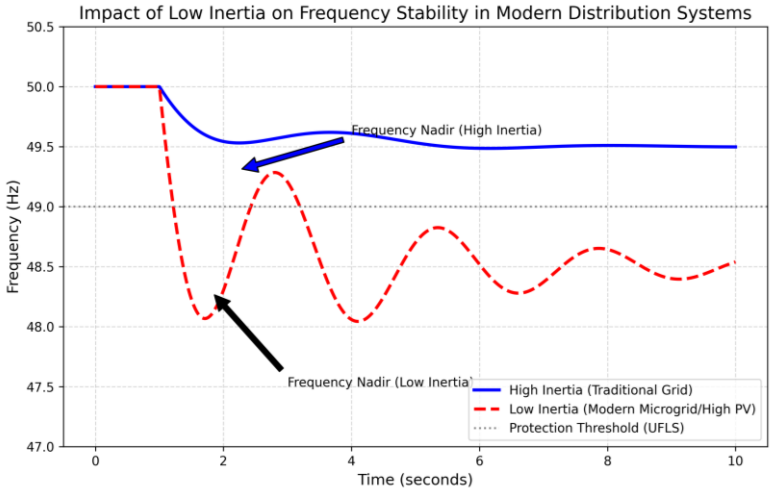
در سیستم‌های توزیع سنتی، توان الکتریکی به صورت یک‌سویه از پست‌های فوق توزیع به سمت مصرف‌کنندگان نهایی جریان می‌یافت. اما در سیستم‌های مدرن، حضور منابع تولید پراکنده (DG)، خودروهای برقی (EV) و ریزشبکه‌ها، پارادایم‌های کیفیت توان را به شدت تغییر داده‌اند. چالش‌های اصلی در سیستم‌های مدرن عبارتند از:

۱-۷- کاهش اینرسی سیستم و ناپایداری‌های گذرا

نیروگاه‌های سنتی دارای روتورهای چرخان بزرگ هستند که اینرسی سنکرون ایجاد می‌کنند و در برابر تغییرات ناگهانی ولتاژ و فرکانس مقاومت می‌کنند. منابع مدرن (مانند PV و باد) از طریق اینورتر به شبکه وصل می‌شوند که اینرسی صفر یا بسیار کمی دارند. در هنگام وقوع یک خطای گذرا، سیستم توزیع مدرن بسیار سریع‌تر دچار کمبود ولتاژ شدید می‌شود، زیرا منبع پشتیبان آنی برای جبران افت ولتاژ وجود ندارد.

کاهش اینرسی سیستم و ناپایداری‌های گذرا یکی از موضوعات بسیار داغ و پیشرفته در سیستم‌های توزیع و ریزشبکه‌های مدرن است. با جایگزینی نیروگاه‌های سنتی (دارای توربین و روتورهای سنگین) با منابع تجدیدپذیر مبتنی بر اینورتر (مثل پنل‌های خورشیدی)، اینرسی فیزیکی سیستم کاهش می‌یابد که منجر به نوسانات شدید فرکانس و ناپایداری‌های گذرا می‌شود. وقتی اینرسی سیستم کم باشد، نرخ تغییرات فرکانس[۲۵] (RoCoF) به شدت افزایش می‌یابد. در صورت بروز یک خطا یا تغییر بار در سیستم سنتی، انرژی جنبشی ذخیره شده در چرخ‌دنده‌ها و روتورها مانع از افت ناگهانی فرکانس می‌شود، اما در سیستم مدرن (اینرسی کم) فرکانس به سرعت سقوط کرده و ممکن است باعث عملکرد رله‌های فرکانسی و فروپاشی شبکه شود [۵۸،۵۹].

یکی از چالش‌های اساسی در سیستم‌های توزیع مدرن، کاهش اینرسی معادل سیستم به دلیل جایگزینی ماشین‌های سنکرون با منابع انرژی تجدیدپذیر مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت است. مطابق با نتایج شبیه‌سازی در شکل (۱۰)، در سیستم‌های با اینرسی پایین، پارامتر فرکانس حضیض[۲۶] به شدت کاهش یافته و نرخ تغییرات فرکانس افزایش می‌یابد. این پدیده نه تنها پایداری گذرا را تضعیف می‌کند، بلکه تجهیزات حساس را در معرض قطع ناگهانی ناشی از عملکرد رله‌های فرکانسی قرار می‌دهد. راهکار پیشنهادی، استفاده از اینرسی مجازی[۲۷] از طریق الگوریتم‌های کنترلی پیشرفته در اینورترهای UPQC و D-STATCOM برای بهبود پاسخ دینامیکی شبکه است. همانطور که مشاهده می‌شود، سیستم با اینرسی پایین دچار نوسانات شدید شده و زمان بیشتری طول می‌کشد تا به پایداری برسد و همچنین فرکانس با سرعت بسیار بالایی سقوط می‌کند که می‌تواند باعث عملکرد اشتباه رله‌های حفاظتی شود.



شکل (۱۰): مقایسه پاسخ فرکانسی سیستم در برابر اغتشاش؛ مقایسه سیستم سنتی (اینرسی بالا) با ریزشبکه مدرن (اینرسی پایین).

Figure (10): Comparison of system frequency response to disturbance; comparison of traditional system (high inertia) with modern microgrid (low inertia).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

۷-۲- تغییر در پروفیل ولتاژ و پدیده بیشبود ولتاژ معکوس

در شبکه‌های مدرن، زمانی که تولید نیروگاه‌های خورشیدی در اوج خود قرار دارد و بار شبکه کم است (مثلاً در ساعات میانی روز)، جهت جریان توان معکوس می‌شود. این امر منجر به افزایش ولتاژ در انتهای فیدرها می‌گردد. این پدیده باعث وقوع بیشبود ولتاژ طولانی‌مدت می‌شود که می‌تواند به عایق تجهیزات خانگی آسیب زده و باعث خروج خودکار اینورترهای خورشیدی از مدار شود [۶۰].

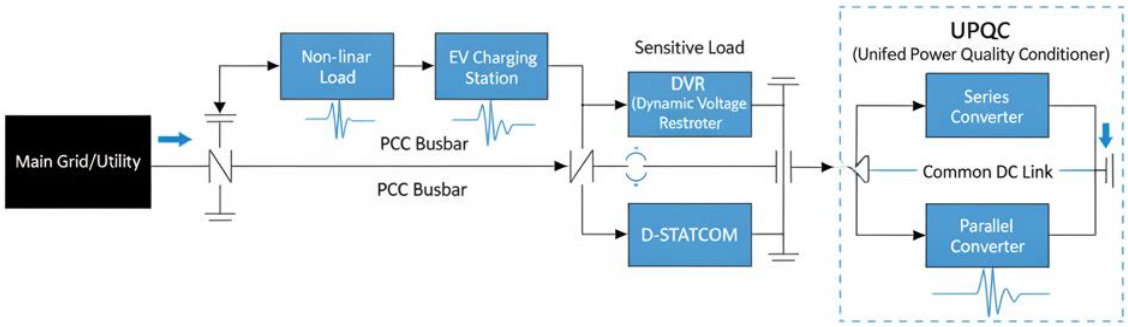
۷-۳- حفاظت و قطعی‌های کاذب

حضور DGها باعث تغییر در سطح جریان اتصال کوتاه می‌شود. منبع تولید پراکنده می‌تواند جریان خطا را به سمت محل خطا تزریق کند، که باعث می‌شود رله‌های حفاظتی بالادست، خطا را به اشتباه تشخیص دهند یا برعکس، به دلیل کاهش حساسیت رله، خطا دیرتر پاک شود. این ناهماهنگی حفاظتی منجر به افزایش تعداد دفعات قطعی ولتاژ برای مشترکینی می‌شود که اصلاً در محدوده خطای اصلی نبوده‌اند.

۷-۴- اثرات کلیدزنی بارهای غیرخطی و خودروهای برقی

ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی از یکسوکننده‌های قدرت بزرگ استفاده می‌کنند. ورود ناگهانی تعداد زیادی خودرو به مد شارژ در یک محله، مشابه استارت یک موتور بزرگ عمل کرده و باعث کمبود ولتاژ عمیق در باس‌بار محلی می‌شود. همچنین هارمونیک‌های تولیدی توسط این شارژرها، شکل موج ولتاژ را دفرمه کرده و شناسایی دقیق دامنه ولتاژ برای تشخیص کمبود/بیشبود ولتاژ را توسط سنسورها دشوار می‌کند [۶۱].

شکل (۱۱) ساختار یک سیستم توزیع مدرن را نشان می‌دهد که در آن بارهای غیرخطی و خودروهای برقی باعث اعوجاج در باس اصلی شده‌اند. ادوات UPQC و DVR با استفاده از الگوریتم‌های کنترلی مبتنی بر تئوری توان راکتیو لحظه‌ای، وظیفه بازیابی ولتاژ و حذف مولفه‌های نوسانی را بر عهده دارند. بارهای غیرخطی بیشتر منشأ هارمونیک و اعوجاج هستند و خودروهای برقی علاوه بر هارمونیک، موجب تغییرات شدید بار، افت ولتاژ و تنش بهره‌برداری در شبکه توزیع می‌شوند.



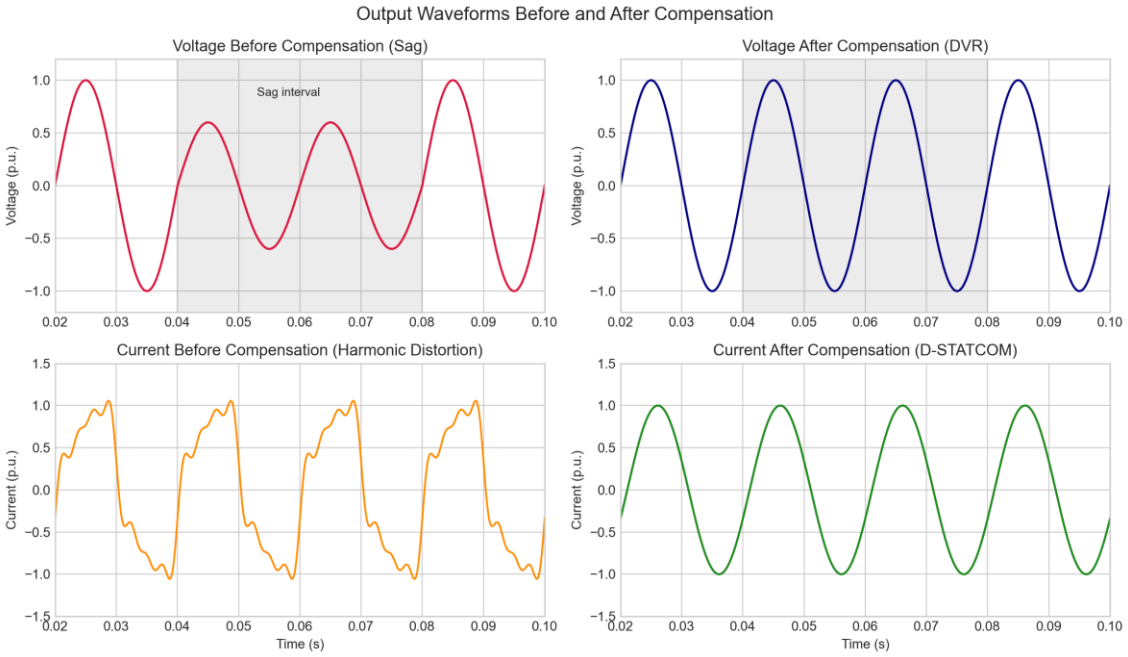
شکل (۱۱): معماری سیستم توزیع مدرن شامل ادوات جبران‌ساز توان (DVR، D-STATCOM و UPQC) جهت مدیریت کیفیت توان در حضور بارهای غیرخطی، ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی (EV) و منابع انرژی تجدیدپذیر.

Figure (11): Modern distribution system architecture including power compensation devices (DVR, D-STATCOM, and UPQC) to manage power quality in the presence of nonlinear loads, electric vehicle (EV) charging stations, and renewable energy sources.

مطابق با نتایج شبیه‌سازی در شکل (۱۲)، مشاهده می‌شود که در بازه زمانی مورد نظر، ولتاژ شبکه دچار کمبود ولتاژ به میزان ۳۰ درصد شده است. واحد جبران‌ساز سری (DVR) با تزریق ولتاژ هم‌فاز، موفق شده است ولتاژ بار را در سطح ۱ پریونیت ثابت نگه دارد. همزمان، در بخش جریان، بار غیرخطی (مانند ایستگاه شارژ خودروی برقی) جریانی با اعوجاج هارمونیکی بالا از شبکه می‌کشد. واحد جبران‌ساز موازی (D-STATCOM) با تزریق جریان‌های جبران‌ساز، تمامی هارمونیک‌ها را فیلتر کرده و

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

جریان سمت منبع را به صورت یک موج سینوسی کامل درآورده است. این عملکرد دوگانه، پایداری تجهیزات حساس را تضمین کرده و از انتشار آلودگی هارمونیکی به سایر بخش‌های شبکه جلوگیری می‌کند [۶۲].



شکل (۱۲): نتایج شبیه‌سازی عملکرد سیستم جبران‌ساز کیفیت توان در حضور اختلالات ولتاژ و بارهای غیرخطی؛ (الف) بهبود ولتاژ بار در هنگام وقوع کمبود ولتاژ توسط واحد سری، (ب) حذف هارمونیک‌های جریان بار و سینوسی‌سازی جریان منبع توسط واحد موازی.

Figure (11): Simulation results of the performance of the power quality compensation system in the presence of voltage disturbances and nonlinear loads; (a) improvement of the load voltage during a voltage shortage by the series unit, (b) elimination of load current harmonics and sinusoidalization of the source current by the parallel unit.

۵-۷- پدیده جزیره‌ای شدن

در سیستم‌های مدرن، بخشی از شبکه ممکن است پس از قطعی شبکه اصلی، توسط DGهای محلی برق‌دار بماند. اگر کنترل‌کننده‌های ریزشبکه به سرعت تعادل بار و تولید را برقرار نکنند، ولتاژ در وضعیت جزیره‌ای به سرعت دچار نوسانات شدید می‌شود که برای ایمنی پرسنل تعمیرات و سلامت تجهیزات مشترکین یک تهدید جدی است [۶۳].

مطابق شکل (۱۳)، پیش از وقوع جزیره‌ای شدن، ولتاژ و فرکانس تحت مرجع شبکه سراسری در مقدار نامی پایدار هستند. با قطع اتصال در PCC، مرجع سخت شبکه حذف شده و پویایی ریزشبکه تابع تعادل لحظه‌ای بین تولید و بار می‌شود. در نتیجه، ولتاژ و فرکانس دچار انحراف و نوسان گذرا می‌شوند. شدت این انحراف به سطح اینرسی معادل، ظرفیت کنترل اینورترها، و میزان عدم تطابق تولید-مصرف بستگی دارد. همانطور که مشاهده می‌شود پس از جدایی، به علت عدم تعادل توان راکتیو، دامنه ولتاژ از مقدار نامی فاصله می‌گیرد و نوسان می‌کند و به دلیل نابرابری بین توان تولیدی DG و توان مصرفی بار، فرکانس از ۵۰ هرتز منحرف شده و رفتار نوسانی/گذرا پیدا می‌کند. این پاسخ گذرا بیان می‌کند که در نبود کنترل مناسب، جزیره ناخواسته می‌تواند باعث خروج ولتاژ و فرکانس از حدود مجاز، عملکرد حفاظتی و حتی فروپاشی ناحیه محلی شود.

برای مقایسه، خلاصه چالش‌ها در جدول (۵) آمده است. براساس سرعت پاسخ‌دهی، اگر نیاز به جبران در مقیاس میلی‌ثانیه باشد (برای بارهای حساس الکترونیکی)، DVR و فیلترهای اکتیو بهترین گزینه‌ها هستند. اگر نوسانات کند ولتاژ در سطح شبکه توزیع (ناشی از تغییرات بار روزانه) باشد، تپ‌چنجرها اقتصادی‌ترین راهکار هستند. براساس نوع اختلال، برای مقابله با قطعی کامل، هیچ ادوات الکترونیک قدرتی جایگزین UPS یا سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی با باتری نمی‌شود، زیرا نه فقط به تنظیم ولتاژ نیاز است بلکه به به تأمین انرژی واقعی نیز نیاز است. برای مقابله با بیشبود ولتاژ یا افت‌های ناشی از تزریق توان راکتیو، ادوات موازی مثل STATCOM بهترین عملکرد را در شبکه‌های مدرن دارند. براساس ترکیب هوشمند، امروزه در شبکه‌های

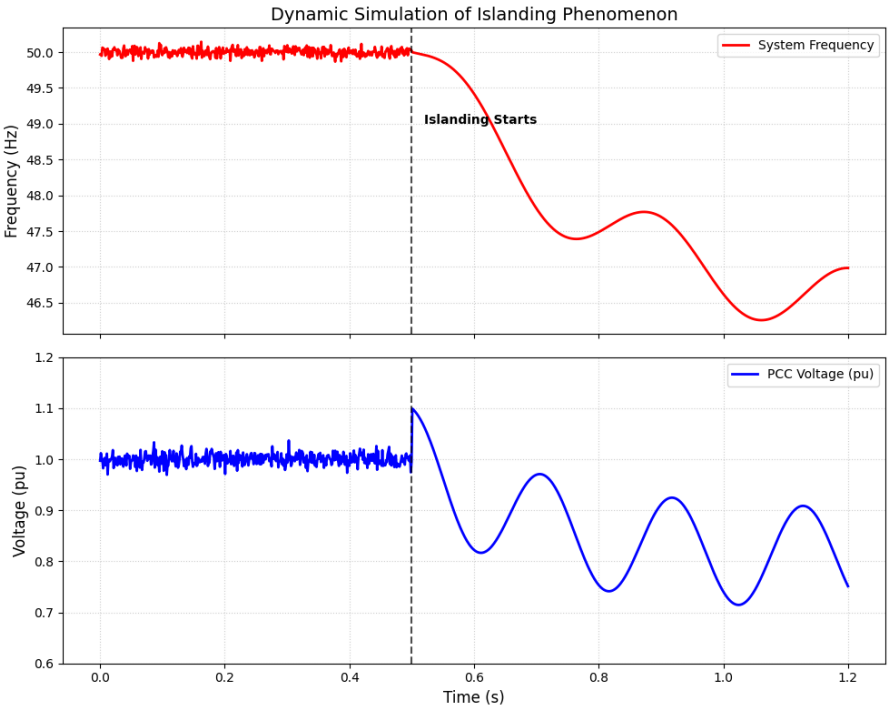
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

هوشمند از ترکیب ادوات استفاده می‌شود. برای مثال، استفاده از یک STATCOM برای تثبیت ولتاژ کل فیدر و یک UPS محلی برای تجهیزات حیاتی یک کارخانه، ترکیبی ایده‌آل است که هم بازدهی اقتصادی دارد و هم پایداری سیستم را تضمین می‌کند.

Table (5): Performance comparison of power quality improvement equipment

جدول (۵): خلاصه چالش‌ها در شبکه مدرن

پدیده غالب	تأثیر مستقیم بر کیفیت توان	عامل تغییر
بیشبود ولتاژ	جریان توان معکوس در ساعات کم‌باری	نفوذ بالای فتوولتائیک
کمبود ولتاژ	پاسخ سریع و شدید به اغتشاشات	حذف اینرسی مکانیکی
کمبود ولتاژ	تقاضای ناگهانی و بارهای ضربه‌ای	خودروهای برقی
دفرمه شدن موج ولتاژ	تولید هارمونیک و نویز فرکانس بالا	اینورترهای قدرت



شکل (۱۳): نتایج شبیه‌سازی پدیده جزیره‌ای شدن در ریزشبکه. پس از باز شدن کلید در نقطه اتصال مشترک در ۰/۵ ثانیه، به دلیل عدم تعادل توان اکتیو و راکتیو، انحراف فرکانس و نوسانات ولتاژ در ناحیه جزیره‌ای مشاهده می‌شود.

۸- مرور مطالعات انجام شده

در این قسمت به تعدادی از مطالعات انجام شده در زمینه بهبود کیفیت توان در سیستم توزیع اشاره شده است.

افت ولتاژ، چالش مهمی در شبکه‌های توزیع مدرن است که باعث ایجاد تأثیرات اقتصادی قابل توجهی، به ویژه برای بارهای صنعتی حساس، می‌شود. در مرجع [۶۴] یک جبران‌ساز افت ولتاژ سه فاز جدید با استفاده از توپولوژی تبدیل AC-AC ارائه می‌دهد. برخلاف راه‌حل‌های مرسوم مانند بازیابی‌کننده‌های ولتاژ پویا، معماری پیشنهادی نیاز به عناصر ذخیره‌سازی انرژی و خازن‌های لینک DC را از بین می‌برد. یکی از ویژگی‌های کلیدی این توپولوژی، مکانیسم برق‌رسانی بین فازی آن است که در آن هر فاز توسط دو فاز سالم باقی‌مانده پشتیبانی می‌شود. این رویکرد به طور خاص برای مقابله با افت ولتاژ تک فاز طراحی شده است و عملکرد قوی را حتی در طول افت ولتاژ شدید تضمین می‌کند. علاوه بر این، جبران‌کننده، تداوم تغذیه سه فاز را حتی در صورت افت کل فاز حفظ می‌کند و قادر به کاهش افت ولتاژ متعادل/نامتعادل در کنار پرش فاز است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

در مرجع [۶۵] یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه به‌منظور مکان‌یابی بهینه پایشگرهای کیفیت توان در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. تابع هدف این مسئله شامل شش شاخص کلیدی است: حداقل‌سازی هزینه‌های پایش، کاهش ابهام توپولوژیکی، حداکثرسازی پوشش بار و انشعابات شبکه، و همچنین کاهش تعداد افت‌ولتاژهای پایش‌نشده به همراه بیشینه‌سازی افزونگی در پایش این رخدادها. برای حل این مسئله، از الگوریتم تکاملی چندهدفه مبتنی بر جداول (MEAT) استفاده شده است. نتایج حاصل از آزمون بر روی سیستم‌های تست IEEE نشان می‌دهد که الگوریتم MEAT موفق به ارائه جبهه پارتو با توزیع مناسب و تنوع بالا شده است که ابزاری کارآمد برای برنامه‌ریزی سیستم‌های پایش کیفیت توان محسوب می‌شود. مدل پیشنهادی به شرکت‌های برق این امکان را می‌دهد تا با تحلیل دقیق نسبت هزینه به فایده در کنار انعطاف‌پذیری عملیاتی، استراتژی‌های بهینه‌ای برای سرمایه‌گذاری در پایش مستمر کیفیت توان اتخاذ کنند.

نتایج و ایده‌های ارائه‌شده در مرجع [۶۶] در چهار حوزه کلیدی کاربرد دارند: نخست، اصول استخراج‌شده از نحوه انتشار افت‌ولتاژها می‌تواند مبنای برنامه‌ریزی و اجرای سیستم‌های پایش کیفیت توان قرار گیرد، که تجربه‌ی موفق پیاده‌سازی آن در لیتوانی مؤید این امر است. دوم، طرح آزمون مبتنی بر BRELL قابلیت توسعه و استفاده در پژوهش‌های آتی را داراست. سوم، متدولوژی پیشنهادی که تلفیقی از شاخص‌های قابلیت اطمینان و تحلیل احتمالاتِ عوامل وقوع خطا است، ابزاری کارآمد برای مدیریت شبکه فراهم می‌کند؛ علاوه بر این، روش ابداعی برای تخمین شباهت توابع توزیع، کاربردی عمومی و فراتر از حوزه تخصصی فعلی دارد. در نهایت، یافته‌های این پژوهش در ابعاد کلان، همچون برنامه‌ریزی شبکه، تدوین استراتژی‌های ملی انرژی و چارچوب‌های قانونی، و همچنین ایجاد پایگاه‌داده‌های PQ جهت آموزش الگوریتم‌های هوش مصنوعی بسیار راهگشا خواهد بود.

تعیین دقیق محل منبع فرورفتگی ولتاژ نقش مهمی در بهبود کیفیت توان و همچنین مشخص شدن مسئولیت میان تأمین‌کننده و مصرف‌کننده برق دارد. با این حال، روش‌های موجود برای مکان‌یابی این پدیده معمولاً ساختار پیچیده‌ای دارند، به محاسبات سنگین نیازمندند و به شدت تحت تأثیر خطاهای اندازه‌گیری و نوع خطا قرار می‌گیرند؛ در نتیجه کارایی مکان‌یابی کاهش یافته و دقت نتایج نیز محدود می‌شود. به همین منظور، در مرجع [۶۷] روشی برای شناسایی محل منبع فرورفتگی ولتاژ ارائه شده است که بر پایه قطبیت توان و تطبیق ویژگی‌های دوقلو عمل می‌کند. در گام نخست، با استفاده از قطبیت توان راکتیو اغتشاشی مؤلفه‌های توالی فرورفتگی در نقطه پایش، خطی که فرورفتگی در آن رخ داده است تعیین می‌شود. سپس چارچوب پیاده‌سازی سیستم قدرت دوقلو تشریح شده و با ترکیب توان راکتیو اغتشاشی مؤلفه‌های توالی مثبت و منفی، ویژگی‌های دوقلو تعریف و پایگاه داده مربوط به آن ایجاد می‌گردد. در ادامه، برای سنجش میزان شباهت داده‌ها از نرم طیفی و ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده و مدلی برای تعیین دقیق محل منبع فرورفتگی طراحی می‌شود که در آن بیشینه‌سازی میزان تطابق بین ویژگی‌های دوقلوی از پیش تعریف‌شده و داده‌های واقعی فرورفتگی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. در نهایت، به منظور حل مدل مکان‌یابی از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ بهبودیافته استفاده می‌شود. کارایی و دقت روش پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی روی شبکه استاندارد ۳۳ باس IEEE مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج، برتری آن را نسبت به روش‌های موجود نشان می‌دهد.

تعیین محل منشأ افت ولتاژ نقشی کلیدی در شناسایی عامل مسئول اختلالات کیفیت توان و پایش وضعیت بهره‌برداری تجهیزات شبکه ایفا می‌کند. در مرجع [۶۸] یک روش بهبودیافته مبتنی بر امپدانس افزایشی برای تعیین محل منشأ افت ولتاژ در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. از آنجا که رفتار مؤلفه‌های توالی در انواع مختلف افت ولتاژ، تابعی از نحوه عملکرد نقطه خنثی سیستم است، این مطالعه ابتدا با تدوین تئوری جهت‌یابی منشأ افت ولتاژ، معیارهای مکان‌یابی را متناسب با شرایط نقطه خنثی در شبکه توزیع چین استخراج می‌کند. استراتژی نهایی مکان‌یابی با تحلیل ظرفیت عبور افت ولتاژ از ترانسفورماتورهای توزیع و اثر گذراهای سیستم بر محاسبات امپدانس افزایشی تکمیل گردیده است. روش پیشنهادی با تکیه بر نقاط اندازه‌گیری موجود کیفیت توان و برخورداری از مبانی فیزیکی شفاف، توسعه یافته است. در نهایت، کارایی این رویکرد از طریق تحلیل‌های تئوری، شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌های آزمایشگاهی به اثبات رسیده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

در مرجع [۶۹] روشی مبتنی بر انرژی اغتشاش و تطبیق الگو برای شناسایی منشأ افت ولتاژ و بازسازی رخداد ارائه شده است. در گام نخست، با بررسی تغییرات جهت جریان انرژی در نقاط پایش پیش و پس از وقوع خطا، موقعیت بالادست و پایین‌دست منبع افت ولتاژ تعیین می‌شود. سپس با ترکیب نتایج حاصل از چندین نقطه اندازه‌گیری، محل دقیق رخداد مشخص می‌گردد. این رویکرد مشکل کاهش دقت مکان‌یابی ناشی از جریان‌های توان چندجهته در شبکه‌های حلقوی فعال دارای منابع تجدیدپذیر را برطرف می‌کند. در ادامه، فناوری تطبیق الگو برای توسعه مدل برآورد معکوس افت ولتاژ به‌کار گرفته شده است. به این منظور، با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو، بانک الگوهای شناسایی افت ولتاژ ایجاد می‌شود. داده‌های واقعی حاصل از تعداد محدودی نقطه پایش، بر اساس ویژگی‌های استخراج‌شده با الگوهای موجود تطبیق داده شده و امکان بازسازی پس از رخداد و تخمین شدت افت ولتاژ در گره‌های فاقد تجهیزات اندازه‌گیری فراهم می‌شود.

مکان‌یابی منشأ افت ولتاژ به معنای تعیین این موضوع است که افت ولتاژ در کدام سمت از تجهیز پایش شبکه ایجاد شده است. در مرجع [۷۰] با تحلیل خطاهای شبکه قدرت و بررسی مسیر بین نقطه خطا و دستگاه اندازه‌گیری، شبکه در دو سوی تجهیز پایش به صورت دو شبکه تک‌درگاهی معادل مدل‌سازی می‌شود. سپس با استفاده از علامت بخش حقیقی امپدانس داخلی این شبکه‌ها، جهت و محل وقوع منشأ افت ولتاژ مشخص می‌گردد. بر اساس این رویکرد، اگر بخش حقیقی امپدانس داخلی مقدار مثبت داشته باشد، جهت منشأ افت ولتاژ با جهت مرجع منطبق بوده و رخداد در سمت پایین‌دست قرار دارد. در مقابل، منفی بودن این مقدار نشان‌دهنده آن است که منشأ افت ولتاژ در خلاف جهت مرجع و در سمت بالادست واقع شده است. در این مقاله نحوه محاسبه بخش حقیقی امپدانس داخلی نیز ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این روش قادر است منشأ افت ولتاژ را با دقت کامل در انواع مختلف ساختارهای شبکه قدرت، از جمله شبکه‌های شعاعی تک‌منبع و چندمنبع، شبکه‌های به‌هم‌پیوسته و شبکه‌های حلقوی، و همچنین در شرایط مختلف زمین‌کردن نقطه خنثی، شناسایی کند.

۹- نتیجه‌گیری

پدیده‌های کمبود، بیشبود و قطعی ولتاژ از مهم‌ترین تهدیدهای کیفیت توان در سیستم‌های توزیع الکتریکی مدرن به شمار می‌روند. با توجه به افزایش سهم بارهای حساس، توسعه منابع تولید پراکنده، و پیچیده‌تر شدن ساختار شبکه‌های توزیع، اثرات این اختلالات بیش از گذشته نمایان شده است. هرچند این سه پدیده از نظر شدت و مدت زمان با یکدیگر تفاوت دارند، اما همگی می‌توانند آثار جدی بر عملکرد تجهیزات، تداوم فرآیندهای صنعتی و هزینه‌های بهره‌برداری داشته باشند.

Table (6): Comparison of methods for improving important power quality phenomena

جدول (۶): مقایسه روش‌های بهبود پدیده‌های مهم کیفیت توان

نقاط قوت	نوع اتصال	اختلالات تحت پوشش	پدیده هدف (تأثیر اصلی)	روش جبران‌سازی
بالاترین سطح اصلاح کیفیت توان (همه در یک دستگاه)	ترکیبی (سری و موازی)	تمامی موارد (کمبود و بیشبود ولتاژ، هارمونیک و عدم تعادل)	اصلاح جامع ولتاژ و جریان	UPQC
پاسخ‌دهی میلی‌ثانیه‌ای، اصلاح ولتاژ بار	سری	کمبود و بیشبود ولتاژ	کمبود ولتاژ	DVR
چندمنظوره (جبران توان، تعادل فاز، فیلتر هارمونیک)	موازی	کمبود، بیشبود ولتاژ، عدم تعادل	تنظیم ولتاژ و عدم تعادل	D-STATCOM
تأمین انرژی ذخیره، تداوم کامل	ترکیبی	کمبود و قطعی ولتاژ	قطعی ولتاژ	UPS
تخصص بالا در بهبود شکل موج و THD	موازی	هارمونیک	حذف هارمونیک	فلیتر اکتیو
بسیار قابل اطمینان و ارزان برای تغییرات کند	سری	کمبود ولتاژ و بیشبود ولتاژ	تنظیم ولتاژ بلندمدت	تپ‌چنجر ترانسفورماتور

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

تحلیل‌ها نشان می‌دهد که هیچ راهکار واحدی برای همه شرایط کافی نیست، بلکه کنترل مؤثر این پدیده‌ها مستلزم ترکیب فناوری‌های جبران‌ساز سریع، سامانه‌های پشتیبان انرژی، اتوماسیون توزیع و طراحی مناسب شبکه است. به‌کارگیری تجهیزاتی مانند DVR، UPS، DSTATCOM و UPQC، همراه با بازآرایی هوشمند شبکه و پایش برخط پارامترهای ولتاژ، می‌تواند سطح تاب‌آوری شبکه را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. در جدول (۶) خلاصه‌ای از مقایسه بین روش‌های مختلف بهبود کیفیت توان آمده است. در نهایت، حرکت به سوی شبکه‌های هوشمند و دیجیتال، فرصت‌های جدیدی برای مدیریت کیفیت توان فراهم کرده است. با این حال، موفقیت در این مسیر مستلزم سرمایه‌گذاری هدفمند، بهره‌گیری از الگوریتم‌های کنترلی پیشرفته، و تدوین سیاست‌های بهره‌برداری مبتنی بر داده است. از این منظر، توجه به کیفیت توان نه‌تنها یک ضرورت فنی، بلکه یک الزام راهبردی برای تضمین قابلیت اطمینان، بهره‌وری و پایداری سیستم‌های قدرت آینده محسوب می‌شود.

سپاسگزاری

از حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول و همکاران محترم نشریه که در بهبود کیفیت مقاله کمک کرده‌اند، صمیمانه سپاسگزاریم.

References

مراجع

[1] F. Ostovar, H. Barati, S.S. Mortazavi, "Multi-objective allocation of distributed generation resources and capacitor banks based on a two-stage fuzzy method and ε-constrained optimization", Signal Processing and Renewable Energy, vol. 8, no. 3, pp. 73-94, Sept. 2024, https://doi.org/10.30495/SPRE.2024.1128320.

[2] H. Bagheri-Tolabi, A. Lashkar-Ara, "Multi-objective reconfiguration of distribution networks by combining fuzzy logic, symbiotic search algorithm and spanning tree theory to reduce power losses, load imbalances and improve voltage profile", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 11, no. 4, pp. 51-59, Dec. 2023, https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222468.1401.11.4.6.4.

[3] A. Barani, M. Moazzami, G. Shahgholian, F. Haghighatdar-Fesharaki, "Integrated optimization of distribution system in the presence of DGs and EVs: Reconfiguration, charging management, and reactive power coordination using MINLP", Signal Processing and Renewable Energy (SPRE), vol. 9, no. 4, Article Number: 23, Dec. 2025, https://doi.org/10.57647/spre.2025.0904.23.

[4] S. Tamalouzt, K.F. Sayeh, K. Djermouni, Y. Belkhier, A. Hamasse, "Control, reliability analysis, and intelligent energy management optimization for resilient multi-pump irrigation system powered by DFIG-based wind energy system", Results in Control and Optimization, Article Number: 100668, Feb. 2026, https://doi.org/10.1016/j.rico.2026.100668.

[5] M.A. Fkirin, Z.M. Gowaly, E.A. Elsheikh, "Dynamic controller design for maximum power point tracking control for solar energy systems", Technologies, vol. 13, no. 2, Article Number: 71, Feb. 2025, https://doi.org/10.3390/technologies13020071.

[6] M. Zhang, L. Ming, "Issues of stability and control in power electronics-based energy storage systems: Critical review and methodological extensions of large-scale ac and dc power networks", Chemical Engineering Journal, vol. 536, Article Number: 175872, May 2026, https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.175872.

[7] D. Gamage, C. Wanigasekara, A. Ukil, A. Swain, "Multi-level consensus based load frequency controller with multi-battery energy storage systems", Electric Power Systems Research, vol. 239, Article Number: 111208, Feb. 2025, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111208.

[8] J. Olano, H. Camblong, J.A. López-Ibarra, T.T. Lie, "Development of energy management systems for electric vehicle charging stations associated with batteries: Application to a real case", Applied Sciences, vol. 15, no. 16, Article Number: 8798, Aug. 2025, https://doi.org/10.3390/app15168798.

[9] F. Locment, M. Sechilariu, "Modeling and simulation of dc microgrids for electric vehicle charging stations", Energies, vol. 8, pp. 4335-4356, May 2015, https://doi.org/10.3390/en8054335.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

[10] P. Megantoro, S.A. Halim, N.A.M. Kamari, L.J. Awalin, M.S. Ali, H.M. Rosli, "Optimizing reactive power dispatch with metaheuristic algorithms: A review of renewable distributed generation integration with intermittency considerations", Energy Reports, vol. 13, pp. 397-423, June 2025, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.12.020.

[11] A. Barani, M. Moazzami, G. Shahgholian, F. Haghighatdar, "Evaluation of optimization and bi-objective reconfiguration of distribution systems in the presence of distributed generation units using a mixed-integer nonlinear programming model", Energy Engineering and Management, vol. 14, no. 3, pp. 28-47, Dec. 2024, https://doi.org/10.22052/eem.2025.256256.1099.

[12] Y. Oğuz, İ. Güney, H. Çalık, "Power quality control and design of power converter for variable-speed wind energy conversion system with permanent-magnet synchronous generator", The Scientific World Journal, vol. 2013, Article Number: 783010, Dec. 2013, https://doi.org/10.1155/2013/783010.

[13] B. Singh, S.S. Murthy, R.R. Chilipi, S. Madishetti, G. Bhuvaneswari, "Static synchronous compensator-variable frequency drive for voltage and frequency control of small-hydro driven self-excited induction generators system", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 8, no. 9, pp. 1528–1538, Sep. 2014, https://doi.org/ 10.1049/iet-gtd.2013.0703.

[14] G. Shahgholian, Z. Azimi, "Voltage sag reasons and its compensation in distribution systems", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 3, no. 1, pp. 57-66, March 2013, https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222468.1391.1.3.4.0.

[15] Q. Li, C. Zheng, S. Liu, S. Dai, B. Zhang, Y. Tang, Y. Wang, "Identification of transmission line voltage sag sources based on multi-location information convolutional transformer", IET Renewable Power Generation, vol. 18, no. 15, pp. 3239-3252, Nov. 2024, https://doi.org/10.1049/rpg2.13092.

[16] M.K. Hossain, P. Chowdhury, I. Nowshin, M.R. Islam, A. Al-Hysam, O. Farrok, "Grid-connected inverter for photovoltaic energy harvesting: Advances in topologies and control techniques", Energy Conversion and Management: X, Article Number: 101422, Jan. 2026, https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101422.

[17] S. Dedeoglu, G.C. Konstantopoulos, A.G. Paspatis, "Grid-supporting three-phase inverters with inherent root mean square current limitation under balanced grid voltage sags", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 11, pp. 11379-11389, Nov. 2021, https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3034860.

[18] Y. Yan, K. Chen, H. Geng, W. Fan, X. Zhou, "A review on intelligent detection and classification of power quality disturbances: Trends, methodologies, and prospects", CMES- Computer Modeling in Engineering and Sciences, vol. 137, no. 2, pp. 1345-1379, June 2023, https://doi.org/10.32604/cmes.2023.027252.

[19] S.A. Rahman, P.A. Janakiraman, P. Somasundaram, "Voltage sag and swell mitigation based on modulated carrier PWM", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 66, pp. 78-85, March 2015, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.09.017.

[20] L. Ma, Y. Li, D. Tian, J. Lou, Y. Chen, X. Liu, "Assessment of voltage sag/swell in the distribution network based on energy index and influence degree function", Electric Power Systems Research, vol. 216, Article Number: 109072, March 2023, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109072.

[21] M.T.L. Gayatri, A.M. Parimi, A.V.P. Kumar, "Utilization of unified power quality conditioner for voltage sag/swell mitigation in microgrid", Proceeding of the IEEE/PESTSE, Bangalore, India, pp. 1-6, Jan. 2016, https://doi.org/10.1109/PESTSE.2016.7516475.

[22] S.N.H. Mousavi, H. Barati, "Direct power control simultaneously in the rotor side converter and grid side converter of DFIG for wind turbines with elimination of network current harmonics", Journal of Novel Researches on Electrical Power, vol. 8, no. 3, pp. 37-51, Dec. 2019, http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222468.1398.8.3.4.9.

[23] M. Kefayat, A.L. Ara, S.N. Niaki, "Optimal placement and sizing of DFIG-based wind farms, fuel cell, photovoltaic units by using particle swarm optimization algorithm and fuzzy logic", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 1, no. 3, pp. 27-36, Dec. 2013, https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222468.1391.1.3.7.3.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

[24] M. Mahdavian, N. Behzadfar, "A review of wind energy conversion system and application of various induction generators", Journal of Novel Researches on Electrical Power, vol. 8, no. 4, pp. 55-66, Dec. 2020, https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222468.1398.8.4.6.3.

[25] E. Hosseini, G. Shahgholian, "Different types of pitch angle control strategies used in wind turbine system applications", Journal of Renewable Energy and Environment, vol. 4, no. 1, pp. 20-35, Feb. 2017. http://dx.doi.org/10.30501/jree.2017.70103.

[26] I.S.M. Chafjiri, A. Azadbar, A. Ghadimi, S.J. Mousavi, "Use of wiener- hammerstein (WH) model optimized with genetic algorithm in identification of photovoltaic system", Journal of Southern Communication Engineering, vol. 14, no. 54, pp. 35-46, Dec. 2025, https://doi.org/10.30495/jce.2025.1993480.1328.

[27] G. Haghshenas, S.M.M. Mirtalaei, H. Mordmand,"High step-up boost-flyback converter with soft switching for photovoltaic applications", Journal of Circuits, Systems, and Computers, vol. 28, no. 1, pp. 1-16, Jan. 2019, https://doi.org/10.1142/S0218126619500142.

[28] M. Konuhova, "Modeling of induction motor response to voltage sags with re-acceleration analysis", Energies, vol. 18, no. 21, Article Number: 5682, Oct. 2025, https://doi.org/10.3390/en18215682.

[29] S. Hasan, A. R. Nair, R. Bhattarai, S. Kamalasadan, K. M. Muttaqi, "Acoordinated optimal feedback control of distributed generators for mitigation of motor starting voltage sags in distribution networks", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 56, no. 1, pp. 864 – 875, Jan./Feb. 2020, https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2954522.

[30] J. Kaushal, P. Basak, "Power quality control based on voltage sag/swell, unbalancing, frequency, THD and power factor using artificial neural network in PV integrated ac microgrid", Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 23, Article Number: 100365, Sept. 2020, https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100365.

[31] E. Sztajmec, P. Szcześniak, "A review on ac voltage variation compensators in low voltage distribution network", Energies, vol. 16, no. 17, Article Number: 6293, Aug. 2023, https://doi.org/10.3390/en16176293.

[32] R.R. Momen, H. Barati, "Location and capacity of UPFC to improve the operation power system using a grasshopper optimisation algorithm", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 8, no. 4, pp. 1-16, March 2020, https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222468.1398.8.4.1.8.

[33] M.A. Heidari, M. Nafar, T. Niknam, "Particle swarm optimization based sliding mode controller for performance improvement of unified power quality controllers inverters subject areas", Journal of Southern Communication Engineering, vol. 12, no. 46, Dec. 2023, https://doi.org/10.30495/jce.2022.1961181.1162.

[34] J. Faiz, G. Shahgholian, M. Torabiyan, "Design and simulation of UPFC for enhancement of power quality in transmission lines", Proceeding of the IEEE/POWERCON, pp. 1-5, Hangzhou, Oct. 2010, https://doi.org/10.1109/POWERCON.2010.5666588.

[35] G. Shahgholian, M.R. Yousefi, "Performance improvement of electrical power system using UPFC Controller", International Journal of Research Studies in Electrical and Electronics Engineering, vol. 5, no. 3, pp. 5-13, 2019, https://doi.org/10.20431/2454-9436.0503002.

[36] M. Hashemi, G. Shahgholian, M. Riahinasab, E. Hosseini, "Analysis of the impact of energy storage system on frequency regulation stability in hydrothermal power system using state space modeling", Hydrogen, Fuel Cell and Energy Storage, vol. 13, no. 1, pp. 1-16, Jan. 2026, https://doi.org/10.22104/hfe.2025.7384.1342.

[37] Q. Wang, X. Li, "Evaluation of battery energy storage system to provide virtual transmission service", Electric Power Systems Research, vol. 244, Article Number: 111570, July 2025, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.111570.

[38] G. Shahgholian, J. Faiz, P. Shafaghi, "Nonlinear control techniques in uninterruptible power supply inverter: A review", Proceeding of the IEEE/ICCEE, pp. 51-55, Dubai, United Arab Emirates, Dec. 2009, https://doi.org/10.1109/ICCEE.2009.99.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]

[39] A.J.A. Costa, H. Morais, "Power quality control using superconducting magnetic energy storage in power systems with high penetration of renewables: A review of systems and applications", Energies, vol. 17, no. 23, Article Number: 6028, Nov. 2024, https://doi.org/10.3390/en17236028.
[40] M. Zamani, G.H. Riahy, N. Abdolghani, M.H. Zamani, "Utilization of thermal energy storage for reducing battery bank size of hybrid (wind-PV) systems", Proceeding of the IEEE/ICCEP, pp. 709-714, Ischia, Italy, June 2011, https://doi.org/10.1109/ICCEP.2011.6036358.
[41] M.N. Dehaghani, T. Korõtko, A. Rosin, "Power quality improvement in DG based distribution systems: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 225, Article Number: 116184, Jan. 2026, https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116184.
[42] P. Rajasekhar, C. Narayana, "Mitigation of voltage sag and swell using distributed power flow controller", International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, vol. 3, no. 8, Aug. 2014, https://doi.org/10.15662/ijareeie.2014.0308038.
[43] Z. Li, W. Li, T. Pan, "An optimized compensation strategy of DVR for micro-grid voltage sag", Protection and Control of Modern Power Systems, vol. 1, no. 10, pp. 1-8, 2016, https://doi.org/10.1186/s41601-016-0018-9.
[44] E. Babaei, M.F. Kangarlu, "Sensitive load voltage compensation against voltage sags/swells and harmonics in the grid voltage and limit downstream fault currents using DVR", Electric Power Systems Research, vol. 83, no. 1, pp. 80-90, Feb. 2012, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.09.013.
[45] G. Shahgholian, E. Haghjoo, A. Seifi, I. Hassanzadeh, "The improvement DSTATCOM to enhance the quality of power using fuzzy-neural controller", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 2, no. 6, pp. 3-16, Aug. 2011, https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1390.2.6.1.7.
[46] G. Shahgholian, Z. Azimi, "Analysis and design of a DSTATCOM based on sliding mode control strategy for improvement of voltage sag in distribution systems", Electronics, vol. 5, no. 3, pp. 1-12, 2016, https://doi.org/10.3390/electronIcs 5030041.
[47] Y. Guo, X. Zhu, J. Deng, S. Li, H. Li, "Multi-objective planning for voltage sag compensation of sparse distribution networks with unified power quality conditioner using improved NSGA-III optimization", Energy Reports, vol. 8, no. 13, pp. 8-17, Nov. 2022, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.08.120.
[48] C. Tu, Q. Guo, F. Jiang, C. Chen, X. Li, F. Xiao, J. Gao, "Dynamic voltage restorer with an improved strategy to voltage sag compensation and energy self-recovery", CPSS Trans. on Power Electronics and Applications, vol. 4, no. 3, pp. 219-229, Sept. 2019, https://doi.org/10.24295/CPSSTPEA.2019.00021.
[49] G. Shahgholian, R. Askari, "The effect of DVR in voltage sag mitigation and comparison with D-STATCOM in a distribution network", International Research Journal of Engineering and Technology, vol. 4, no. 10, pp. 146-162, Jan. 2014.
[50] Y. Mohammadi, R. C. Leborgne, "A new approach for voltage sag source relative location in active distribution systems with the presence of inverter-based distributed generations", Electric Power Systems Research, vol. 182, Article Number: 106222, May 2020, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106222.
[51] G. Shahgholian, S.M.A. Zanjani, "A study of voltage sag in distribution system and evaluation of the effect of wind farm equipped with doubly-fed induction generator", Revue Roumaine des Sciences Techniques, vol. 68, no. 3, pp. 271-276, Dec. 2023, https://doi.org/10.59277/RRST-EE.2023.3.4.
[52] A.M. Saeed, S.H.E. Abdel Aleem, A.M. Ibrahim, M.E. Balci, E.E.A. El-Zahab, "Power conditioning using dynamic voltage restorers under different voltage sag types", Journal of Advanced Research, vol. 7, no. 1, pp. 95–103, Jan. 2016, https://doi.org/10.1016/j.jare.2015.03.001.
[53] A.K. Dehdashti, A. Seyfi, "Application of different topology of z-source inverter based DVR", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 1, no. 2, pp. 1-8, Dec. 2012, https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222468.1391.1.2.1.5.
[54] B. Khan, S. Jadapalli, G.V. Swathi, S.K. Maitra, P. Singh, U. Choudhury, M.L. Biramo, "Power quality improvement of microgrids using unified power quality conditioner (UPQC): A scoping

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

review", Electric Power Systems Research, vol. 253, Article Number: 112573, April 2026, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.112573.

[55] T.H. Wu, S.S. Huang, P.Y. Chen, "Application of a three-phase unified power quality conditioner in a microgrid", IET Smart Grid, vol. 7, no. 6, pp. 872-890, Dec. 2024, https://doi.org/10.1049/stg2.12184.

[56] L. B. G. Campanhol, S. A. O. da Silva, A. A. de Oliveira, V. D. Bacon, "Power flow and stability analyses of a multifunctional distributed generation system integrating a photovoltaic system with unified power quality conditioner", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 34, no. 7, pp. 6241-6256, July 2019, https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2873503.

[57] Y. Xu, X. Xiao, Y. Sun and Y. Long, "Voltage sag compensation strategy for unified power quality conditioner with simultaneous reactive power injection", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 4, no. 1, pp. 113-122, Jan. 2016, https://doi.org/10.1007/s40565-016-0183-x.

[58] H.R. Chamorro, F.R.S. Sevilla, F. Gonzalez-Longatt, K. Rouzbehi, H. Chavez, V.K. Sood, "Innovative primary frequency control in low-inertia power systems based on wide-area RoCoF sharing", IET Energy Systems Integration, vol. 2, no. 2, pp. 151-160, June 2020, https://doi.org/10.1049/iet-esi.2020.0001.

[59] A. Maity, D. Brahma, N. Senroy, "Identification of RoCoF sensitive areas of power system based on its controlling factors", Electric Power Systems Research, vol. 244, Article Number: 111533, July 2025, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.111533.

[60] I.B. Majeed, N.I. Nwulu, "Impact of reverse power flow on distributed transformers in a solar-photovoltaic-integrated low-voltage network", Energies, vol. 15, no. 23, Article Number: 9238, Dec. 2022, https://doi.org/10.3390/en15239238.

[61] A. Barani, M. Moazzami, F. Haghighatdar- Fesharaki, "A unified bi- objective programming framework for active power optimization and reactive power coordination of electric vehicles integrated with distribution feeder reconfiguration", IET Renewable Power Generation, vol. 20, no. 1, Article Number: e70179, Jan. 2026, https://doi.org/10.1049/rpg2.70179.

[62] Z. Wang, X. Guo, J. Li, X. Wang, "Impact of voltage sags on electric-vehicle charger and critical voltage sag determination", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 31, no. 3, pp. 1397-1399, June 2016.

[63] N. Zhou, F. Sun, Q. Wang, X. Meng, "A flexible power control strategy for rotor-side converter of DFIG under unbalanced grid voltage sags", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 90, pp. 64–75, Sept. 2017, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.11.016.

[64] E. Babaei, M.F. Kangarlu, "Cross-phase voltage sag compensator for three-phase distribution systems", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 51, pp. 119-126, Oct. 2013, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.02.016.

[65] H.M.G.C. Branco, M. Oleskovicz, D.V. Coury, A.C.B. Delbem, "Multiobjective optimization for power quality monitoring allocation considering voltage sags in distribution systems", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 97, pp. 1-10, April 2018, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.10.011.

[66] N. Liubčuk, N. Radziukynas, G. Kairaitis, D. Naujokaitis, "Power quality monitors displacement based on voltage sags propagation mechanism and grid reliability indexes", Applied Sciences, vol. 13, no. 21, Article Number: 11778, Oct. 2023, https://doi.org/10.3390/app132111778.

[67] L. Yang, Z. Cai, X. Xia, X. Ren, Z. Fan, D. Kong, J. Chen, "Voltage sag source location based on power polarity and twin characteristics matching", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 18, no. 9, pp. 1841-1854, May 2024, https://doi.org/10.1049/gtd2.13162.

[68] K. Zhu, Y. Wang, P. Yin, J. Ni, "Voltage sag source location technology based on corresponding sequence components", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 9, no. 9, pp. 820-827, June 2015, https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0772.

[69] S. Deng, C. Chen, Y. Peng, H. Huang, G. Shen, "A joint data-physics-driven approach to voltage sag source tracing and inversion estimation", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 20, no. 1, Article Number: e70306, Jan./Dec. 2026, https://doi.org/10.1049/gtd2.70306.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

[70] T. Yi, H. Jie, L. Hao, W. Lei, "Method for voltage sag source location based on the internal resistance sign in a single-port network", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 10, no. 7, pp. 1720-1727, May 2016, https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.1329.

زیرنویس‌ها:

[1] Distributed Generation
[2] Energy Storage Systems
[3] Vehicle Charging Stations
[4] Power Quality
[5] Variable Frequency Drives
[6] Voltage Sag/Dip
[7] Voltage Swell
[8] Interruption
[9] Reliability
[10] Energy Transition
[11] Wind Energy Conversion System
[12] Doubly Fed Induction Generator
[13] Permanent Magnet Synchronous Generator
[14] Maximum Power Point Tracking
[15] Fault
[16] Steady State
[17] Sag Occurrence
[18] Recovery
[19] Load Rejection
[20] Power Smoothing
[21] Dynamic Voltage Restorer
[22] Distribution Static Synchronous Compensator
[23] Unified Power Quality Conditioner
[24] Custom Power Devices
[25] Rate of Change of Frequency
[26] Frequency Nadir
[27] Virtual Inertia

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-22]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026