نشریه علمی(فصلنامه) پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی
سال ششم/ شماره ۲۱/ زمستان ۱۳۹۹/ صفحات ۲۵۰ - ۲۲۹

طراحی سایت فتوولتاییک تعاملی فاقد افت ولتاژ در شبکه توزیع برق: مطالعه موردی سایت فتوولتائیک جرقویه اصفهان

مصطفی اسماعیلی شایان
دانشجوی دکتری مهندسی انرژی‌های تجدید پذیر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
Mostafa.Esmaeili@Modares.ac.ir
غلامحسن نجفی
دانشیار و عضو هیئت‌علمی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
(نویسنده مسئول)
g.najafi@modares.ac.ir
صحرا اسماعیلی شایان
فارغ‌التحصیل مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
Wmsahra@gmail.com

بهره‌گیری از منابع انرژی تجدید پذیر پراکنده در شبکه‌های قدرت، به‌ویژه در سامانه‌های توزیع، رشد قابل‌توجه داشته است. نظر به استفاده از انرژی خورشیدی در شبکه‌های فشار ضعیف و عدم تعادل بار، بررسی راهکاری باهدف بهینه و جبران سازی بار و جلوگیری از افت ولتاژ و کنترل اعوجاج الکتریکی حاصل از پروفیل ولتاژ و اتصال به شبکه ضروری است. در این پژوهش تحلیل و بهینه‌سازی اعوجاج الکتریکی نیروگاه فتوولتاییک محلی در شبکه توزیع برق فشار ضعیف نامتعادل چهار سیم، در افق زمانی معین، انجام‌شده است. شبیه‌سازی بر روی بخشی از نیروگاه فتوولتاییک جرقویه اصفهان که شامل یک تغذیه‌کننده ولتاژ متوسط ۲۰ کیلوولت و شش تغذیه‌کننده فشار ضعیف ۴۰۰ ولت و ۱۶ شین فشار ضعیف می‌باشد، تحت دو سناریو انجام شده است. در سناریوی اول خروجی منابع انرژی پراکنده سه فاز متعادل و بدون کنترل می‌باشد و در سناریوی دوم وضعیتی منظور شده که خروجی این منابع سه فاز نامتعادل باشد. نتایج نشان داد: مدل پیشنهادی موجب ارتقاء فاز پروفیل ولتاژ و تلفات انرژی سالانه به میزان ۱۳۲/۶ مگاوات ساعت شده است.

واژگان کلیدی: جبران سازی بار، نیروگاه فتوولتاییک، شبکه توزیع برق، تلفات انرژی سالانه.

تاریخ دریافت: ۱۲ / ۶ / ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: ۲۴ / ۹ / ۱۳۹۹

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

۱. مقدمه

تعداد ساعات آفتابی سالانه و میزان دریافت انرژی خورشیدی در اغلب مناطق ایران مقدار و پتانسیل فراوانی برای بهره‌برداری دارد. با پیشرفت فنّاوری، انرژی خورشیدی مستقیماً به الکتریسیته تبدیل‌شده و این گام بزرگی در دریافت توان از خورشید است. فنّاوری فتوولتاییک با پتانسیل بالا می‌تواند تا سال ۲۰۳۰ سهم ٪۵ و تا سال ۲۰۵۰ سهم ٪۱۱ از نیاز الکتریسیته در اروپا را بر عهده بگیرد (Europe, 2015). بااین‌وجود، تنها ۱٪ از کل توان الکتریکی موردنیاز انسان‌ها که معادل ۱۸/۴۰۰ ترا وات می‌باشد، از طریق سامانه‌های متنوع تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریکی تأمین می‌شود.(Demiroren and Yilmaz, 2010; Hansen, Narbel and Aksnes, 2017) توسعه سامانه‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدید پذیر محلی و جدا از شبکه، افزایش‌یافته و شبکه‌ی توزیع اصلی را شارژ و تقویت می‌کنند. اما از سوی دیگر، سرازیر شدن نامتوازن این منابع به شبکه توزیع باعث بروز مشکلاتی ازجمله: اضافه ولتاژ و اعوجاج هماهنگ جریان می‌گردد. چنانچه پژوهش‌های مختلفی مدیریت بار شبکه و استانداردسازی پایش، ارزیابی و اطمینان بخشی شبکه فشار ضعیف را برعهده گرفته‌اند (Esmaeili shayan, Najafi and Banakar, 2017; Muduli, Mishra and Jana, 2018; Esmaeili and Najafi, 2019). بررسی انتقادی پژوهش‌های مبتنی بر نیروگاه‌های فتوولتاییک بر شبکه توزیع از موضوعات جذاب و دامنه‌دار مهندسی قدرت است. هدف غالب مطالعات دهه‌ی اخیر استفاده از پخش بار بهینه سه فاز و تک فاز است. پژوهش (Sharma and Saini, 2017) پخش بار بهینه سه فاز نامتعادل در شبکه سه سیم را بررسی و توان اکتیو و ری اکتیو سه فاز هر منبع را، برای کاهش نامتعادل ولتاژ استاندارد می‌کند. پژوهش (Menke, Bornhorst and Braun, 2019) پخش بار بهینه سه فاز را برای شبکه توزیع نامتعادل پیشنهاد و همچنین روش بهینه‌سازی نقطه داخلی را برای کمینه کردن تلفات الکتریکی شبکه ارائه کرده است. پژوهش‌های (Mohapatra, Bijwe and Panigrahi, 2013; Xu, Dang and Kong, 2017) بر اساس ماتریس شبه متقارن برای پخش بار در شبکه‌های توزیع راه‌کارهایی را ارائه کرده

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

است. هدف نهایی، ارائه پخش بار سریع و دقیق برای شبکه‌های توزیع می‌باشد. نامتعادلی بار در شبکه‌های توزیع عوارض و اثرات سوء فراوانی دارد. درواقع امروزه میزان عدم تعادل بار به‌عنوان یکی از شاخص‌های کیفیت انرژی الکتریکی مطرح می‌باشد. علت اساسی پیدایش مشکل عدم تعادل بار توزیع ناهمگون و غیریکنواخت تکفازی ورودی بین فازهای مختلف و رفتار تصادفی و غیر هم‌زمان آن‌ها می‌باشد. در پژوهش (Medeiros Júnior *et al.*, 2015) الگوریتم پخش بار عمومی برای شبکه‌های سه فاز چهار سیمِ شعاعی با در نظر گرفتن سیم خنثی بر اساس پخش بار رفت و برگشتی ارائه‌شده است. در این روش سیم خنثی و زمین در نظر گرفته‌شده و چندین سامانه آزمایشی برای صحت سنجی ارائه‌شده است. پژوهش (Sereeter, Vuik and Witteveen, 2019) مدل نیوتن–رافسون را برای شبکه‌های سه فاز چهارسیم با استفاده مدل تزریق جریان به هر گره به‌کارگیری کرده است. در این روش هر دو سیم خنثی و زمین در مدل وارد خواهند شد. در پژوهش (Naderipour *et al.*, 2019) استراتژی جدیدی برای متعادل کردن جریان بار نامتعادل پیشنهادشده است. در این مقاله یک اینورتر منبع ولتاژ چهار پایه به‌صورت موازی در یک شبکه سه فاز چهار- سیمِ به‌منظور تعادل بار استفاده شده است. پژوهش (Rahman *et al.*, 2018) کاربرد جبران ساز کیفیت توان را در ریزشبکه هوشمند معرفی می‌کند. جبران ساز در این پژوهش برای هر سامانه‌ی تولید پراکنده (DG) در ریزشبکه که شامل دو اینورتر چهار فازی سری–موازی باشد به‌منظور بالا بردن کیفیت توان کاربرد دارد. در پژوهش بنیادی ((Heymsfield *et al.*, 2020 پیشنهاد تبدیل مدار شبکه توزیع چهار سیم به پنج سیمِ داده شده است. در این پژوهش سیم پنجم به‌عنوان خنثی‌کننده و حمل جریان بازگشتی نامتعادل و افزایش ایمنی معرفی شده است. در پژوهش (Yang *et al.*, 2020) استفاده از UPFC برای کنترل جریان انرژی یکپارچه فازها درشبکه‌های فشار ضعیف ۴ سیمِ گزارش شده است. پژوهش بنیادی (Tostado, Kamel and Jurado, 2019) مدل جدیدی برای مسئله پخش بار در شبکه‌های چهار سیمِ ارائه کرده است که شامل هادی زمین و خنثی می‌باشد. در این مدل، روش نیوتن–رافسون برای حل معادلات غیرخطی تزریق جریان استفاده شده است. پژوهش (Islam *et al.*, 2019) نرم‌افزارهایی را جهت تجزیه‌وتحلیل شبکه در

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

شرایط نامتعادل در سامانه‌ی نامتقارن معرفی کرده است. همچنین تأثیر نوع اتصال ترانسفورماتورها و نحوه اتصال نقطه صفر و نحوه کنترل ولتاژ پایانه‌های خروجی ارزیابی‌شده است. پژوهش (Park *et al.*, 2018) از روش پخش بار رفت‌وبرگشت برای تجزیه‌وتحلیل و مطالعه شبکه توزیع چهار سیمِ استفاده و بر روی بخشی از یک شبکه توزیع واقعی پیاده کرده است. در پژوهش (Park, Lee and Sohn, 2019) وضعیت کلی بار تغذیه‌کننده در شبکه واقعی و در طول یک دوره زمانی معین، بررسی و تحلیل شده است. در این پژوهش برای اصلاح و متعادل‌سازی بار الکتریکی، روش جایابی بهینه جبران سازها در طول تغذیه‌کننده پیشنهادشده است. امروزه از این روش به صورت گسترده در شبکه‌ی توزیع برق استفاده می‌شود.

در پژوهش حاضر، وضعیت اعوجاج الکتریکی شبکه فشار ضعیف واقعی چهار سیمِ و نامتعادل، در حضور نیروگاه فتوولتاییک ارزیابی می‌شود. بر این اساس، از پخش بار بهینه استفاده‌شده است و با اضافه شدن قابلیت کنترل بر توان خروجی منابع تولید انرژی خورشیدی در افق زمانی معین، موجب کاهش بیشینه‌ی تلفات انرژی و بهبود وضعیت پروفیل ولتاژ شبکه شده است. همچنین، اثر سامانه‌ی تبدیل انرژی خورشیدی فتوولتاییک در تولید جریان هارمونیک بررسی می‌گردد. هدف از این پژوهش ایجاد مدلی جهت بررسی بار نامتعادل سه فاز متغیر با زمان و تنظیم توان هر فاز نیروگاه فتوولتاییک در هر بازه زمانی و نهایتاً کاهش تلفات انرژی سالانه در شبکه واقعی است.

نوآوری این پژوهش مربوط به تحلیل شبکه‌ی سه فاز چهار سیم فشار ضعیف با اعوجاج الکتریکی در نیروگاه‌های متداول فتوولتاییک و ارائه مدل کاربردی جهت کاهش تلفات انرژی سالانه در بارهای خانگی، تجاری و صنعتی با منحنی مصرف مختلف می‌باشد. مدل شبه دینامیکی سه حوزه تولید، انتقال و توزیع کاربرد برای نخستین بار در نرم‌افزار دیگ‌سایلنت و تحت شبکه واقعی نیروگاه‌های فتوولتاییک ایران شبیه‌سازی و در نرم‌افزار متلب بهینه‌سازی انجام شده است. نظر به گسترش نیروگاه‌های فتوولتاییک محلی و ایجاد بار الکتریکی اعوجاجی بر شبکه‌ی اصلی،

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

این پژوهش جامع و مدل پیشـنهادی می‌توانند مؤلفه‌ی مهمی در تصـمیم‌گیری‌های کلان حوزه‌ی برق و انرژی گردد.

۲. مدل‌سازی بار در شبکه‌ی فشار ضعیف نامتعادل

برای پخش بار در یک شبکه چهار- سیمِ دارای m باس، ماتریس TRX که متشکل از مشخصات امپدانس شاخه‌ها (فاز، سیم خنثی) در تغذیه‌کننده توزیع می‌باشد، تشکیل می‌گردد.(Tleis, 2008)

$$TRX = A^T ZAM \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، ماتریس A بالا مثلثی بوده و با توجه به قانون جریان کیرشهف معرفی می‌گردد. این ماتریس رابطه‌ی بین جریان تزریقی $I^{k.t}$ و جریان شاخه‌ی $J^{k.t}$ می‌باشد. در این رابطه $J^{k.t}$ برابر ماتریس جریان شاخه‌ها بوده و در هر لحظه t از رابطه (۲) به دست می‌آید.(Tleis, 2008)

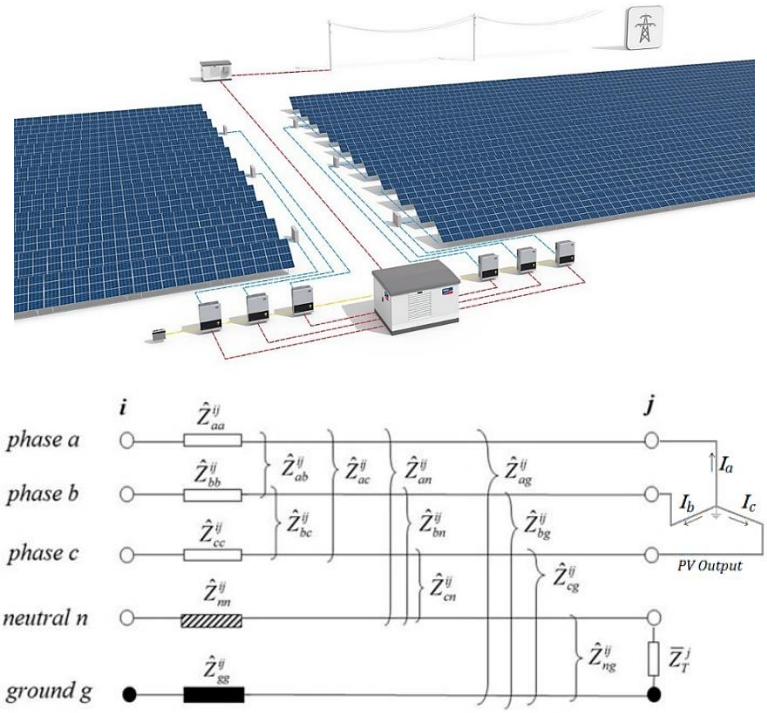
$$J^{k.t} = -AI^{k.t}M \quad \forall t \in h \qquad (۲)$$

در رابطه (۲) بالانویس t بعد زمانی ماتریس، k دوره تکرار و M برابر ماتریس ۵×۵ می‌باشد. اطلاعات شاخه‌ها که یک ماتریس ۵×۵ می‌باشد توسط ماتریس امپدانس Z به صورت رابطه‌ی (۳) استخراج می‌گردد.

$$Z = diag\left[\hat{Z}^{01} \dots \hat{Z}^{ij} \dots \hat{Z}^{(b-1)b}\right] \quad \forall ij \in B \qquad (۳)$$

در رابطه (۳) $\hat{Z}^{ij}$ برابر ماتریس ۵×۵ امپدانس سری خط i-j و بالانویس b نشانگر خطوط موجود شبکه است. این خط شامل سه فاز و یک سیم خنثی می‌باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

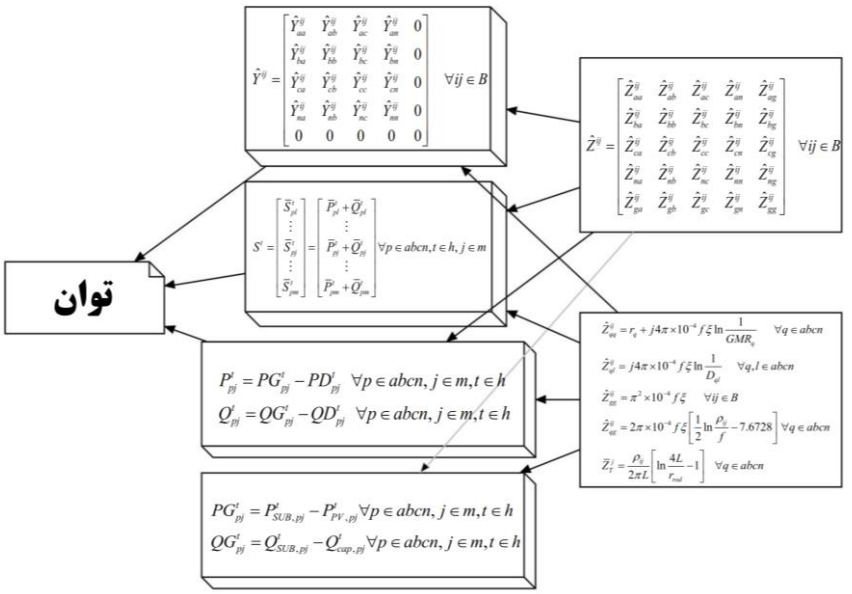


شکل۱. شماتیک و دیاگرام شبکه چهار سیم، شامل سه فاز و یک خط خنثی و زمین

شکل (۱) دیاگرام شبکه‌ی چهار سیمِ با سیستم زمین را نشان می‌دهد. این شبکه شامل سه سیم فاز a، b و c و یک سیم خنثی و سیستم زمین می‌باشد. مشاهده می‌شود یک نیروگاه فتوولتاییک به این شبکه متصل می‌باشد. طبق شکل امپدانس $\hat{Z}^{ij}$ برابر با بلوک ۱ شکل (۲) خواهد بود. برای محاسبه تلفات نیاز به محاسبه امپدانس داخلی(خودی) و متقابل است. امپدانس داخلی $\hat{Z}^{ij}_{qq}$ و امپدانس متقابل $\hat{Z}^{ij}_{ql}$ با توجه به شکل (۲) محاسبه خواهند شد. در بلوک GMR_q ۲ برابر شعاع متوسط هندسی هادی q به ft، r_q برابر مقاومت AC هادی q به $\Omega/mile$، ثابت ξ اگر $\hat{Z}^{ij}_{qq}$ و $\hat{Z}^{ij}_{ql}$ به $\Omega/mile$ باشد برابر ۱/۶۰۹ و اگر به Ω/km باشد، برابر ۱/۰۰۰ خواهد بود، D_{ql} برابر فاصله بین هادی q و l به ft می‌باشد و f نیز فرکانس با واحد هرتز است. همچنین در این رابطه ρ_{ij} برابر

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

مقاومت ویژه خط i-j در Ω-m، $\bar{Z}_T^j$ برابر مقاومت بین زمین و سیم خنثی در گره j و L و r_{rod} به ترتیب برابر طول برق‌گیر زمین و شعاع برق‌گیر زمین مطابق استاندارد IEC 62305 به متر می‌باشد. عبارت $\bar{Z}_T^j$ در برق‌گیرهای تجاری در سامانه‌های توزیع برابر ۳۰ اهم است. درنهایت برای تکمیل مدل چهار سیم، چند اتصال زمین برای قسمت i-j، ادمیتانس شنت اولیه برابر $\bar{Y}^{ij} = j\omega c^{ij}$ به ازای $ij \in B$ و فرکانس زاویه‌ای $\omega = 2\pi f$ و c^{ij} ماتریس اولیه ظرفیت خازنی می‌باشد. با این توضیح؛ ظرفیت خازنی خودی و متقابل و توان تزریقی در هر شین بار به ترتیب مطابق با بلوک ۳ و ۴ محاسبه می‌شود. نهایتاً، توان اکتیو و ری اکتیو به‌عنوان کل توان تزریقی گره j برای هر فاز در لحظه t به‌صورت بلوک ۵ به دست می‌آید. چنانچه توزیع در زمان حضور نیروگاه فتوولتاییک باشد، آنگاه بلوک ۶ به‌عنوان جبران ساز در لحظه t ام استفاده می‌شود. شکل (۲) مدل پیشنهادی محاسبات توان اکتیو و ری اکتیو را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مدل ریاضی توان لحظه‌ای اکتیو و ری اکتیو

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

برای محاسبه گره j جریان $\bar{I}_{pj}^{k.t}$ را که وابسته به $I^{k.t}$ است، فاز $p \in abc$ در لحظه t محاسبه می‌گردد، بنابراین از توان تزریقی $\bar{S}_{pj}^{t}$ و ولتاژ $\bar{V}_{pj}^{k.t}$ داریم:

$$\bar{I}_{pj}^{k.t} = -\left(\frac{\bar{S}_{pj}^{t}}{\bar{V}_{pj}^{k.t} - \bar{V}_{nj}^{k.t}}\right)^{*} + \sum_{p.r \in abcn} \bar{Y}_{pr}^{ij} \bar{V}_{rj}^{k} \qquad \forall j \in B \tag{۴}$$

جریان سیم خنثی و زمین در گره j در زمان t ام به دست می‌آید:

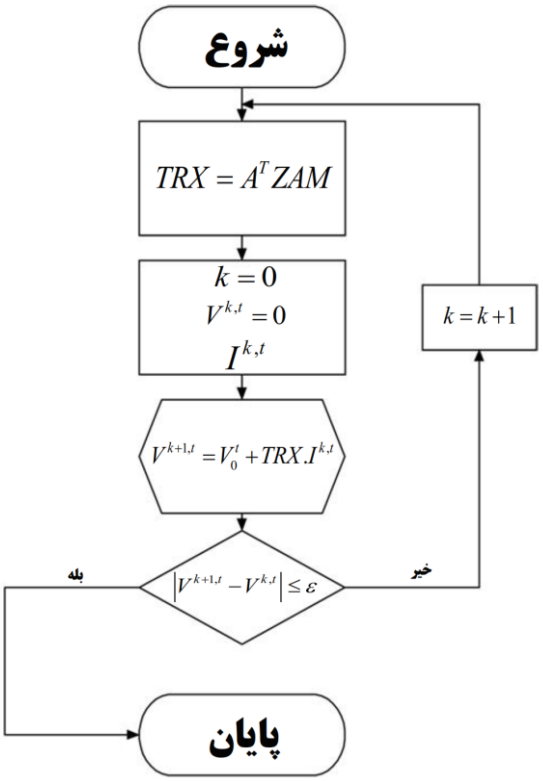
$$\bar{I}_{nj}^{k.t} = \bar{I}_{gj}^{k.t} = -\sum_{p \in abc} \bar{I}_{pj}^{k.t} \qquad \forall j \in B \tag{۵}$$

شرط همگرایی ولتاژ برای سه فاز و سیم خنثی برابر است با:

$$\left|\bar{V}_{pj}^{k+1.t} + \bar{V}_{pj}^{k.t}\right| \leq \varepsilon \quad \forall j \in m.p \in abcn.t \in h \tag{۶}$$

با محاسبه ولتاژ و جریان گره‌ها و جریان شاخه‌ها، تلفات سامانه در مسیر سیم خنثی به دست خواهد آمد. در این پژوهش ولتاژ سه فاز، جریان و تلفات سامانه در هر لحظه از زمان با توجه به اندازه بار و متناسب با شرایط بهینه منابع انرژی به دست می‌آید. نمودار روند نمای پخش بار سه فاز چهار سیم در شکل (۳) نشان داده شده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]



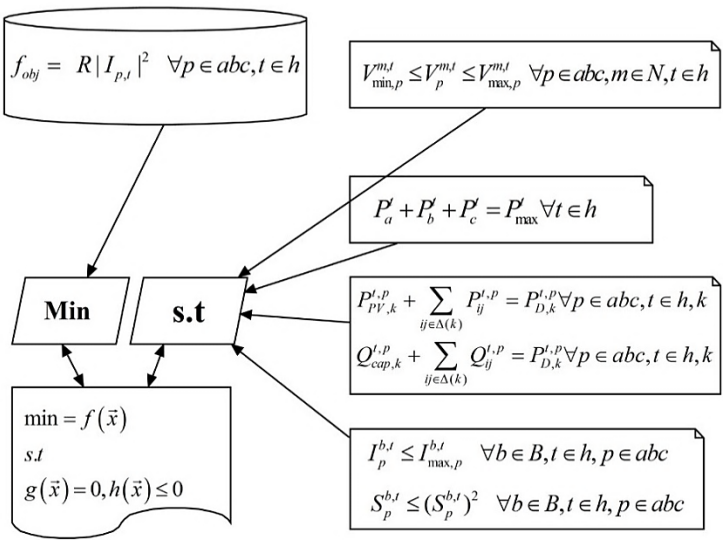
شکل ۳. نمودار روند نمای پخش بار سه فاز چهار سیم

۳. بهینه‌سازی مسئله

در این مقاله، مدل شبه دینامیکی سه حوزه تولید، انتقال و توزیع کاربرد در نرم‌افزار دیگ‌سایلنت و تحت شبکه واقعی نیروگاه‌های فتوولتاییک ایران شبیه‌سازی شده و بهینه سازی از طریق کد برنامه نویسی DPL بخش Object شبکه و استفاده از دستور getAll و Object و استفاده از دستور printfو دسترسی به اطلاعات خطوط و نوشتن در فایل‌های CSVبا دستور fprintf و ارتباط نرم افزار MATLAB و DIgSILENT صورت گرفته است.این مدل، برای حل معادلات و قیود غیر خطی از روش نیوتن–رافسون در محیطی تعاملی و از روش لاگرانژ برای معادلات و قیود برابری

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

خطی و روش فای کو برای نامعادلات خطی استفاده می‌کند. هدف نهایی کمینه‌سازی بوده و تابع هدف و قیود مساله بهینه‌سازی مطابق با شکل (۴) تعریف می‌شوند. بلوک کمینه‌سازی مطابق با شکل (۴) بوده و g قید برابری پخش بار و h قید نابرابری می‌باشد.



شکل ۴. بهینه‌سازی تحلیل اعوجاج الکتریکی نیروگاه فتوولتاییک بر شبکه توزیع واقعی برق

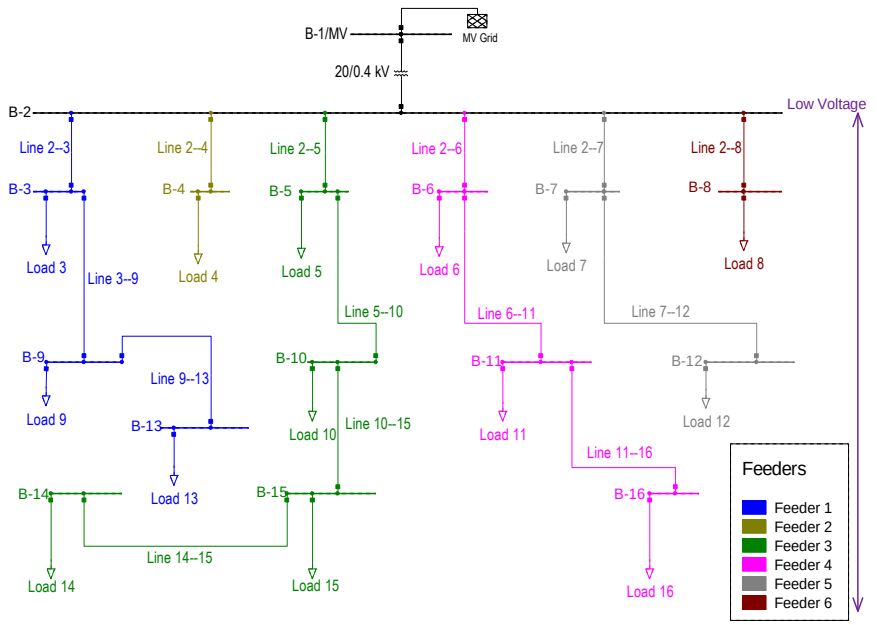
هدف تابع کمینه کردن تلفات توان حقیقی سالانه می‌باشد، که برای بازه مطالعه و سه فاز محاسبه می‌شود. بلوک‌های سمت راست شکل (۴) مدل‌سازی قیود مسئله را نشان می‌دهد. قید ولتاژ، برای استانداردسازی و تعیین محدوده‌ی ولتاژ فاز مربوطه در لحظه t در شین m می‌باشد. قید بیشینه، توان قابل بهره‌برداری منابع فتوولتاییک می‌باشد. اگر در زمان t مجموع بیشینه توان تولیدی از سه فاز فتوولتاییک برابر P_{max}^t برحسب کیلووات باشد، می‌بایست مجموع توان سه فاز هم برابر شود. قید تعادل توان مانند $P_{PV.k}^{t.p}$ و $Q_{cap.k}^{t.p}$ برابر توان حقیقی و ری اکتیو تولیدی توسط فتوولتاییک و خازن در فاز p ام و لحظه t ام است. همچنین $P_{ij}^{t.p}$ و $Q_{ij}^{t.p}$ برای توان حقیقی و ری اکتیو عبوری از خطوط و $P_{D.k}^{t.p}$ و $Q_{D.k}^{t.p}$ بار حقیقی و ری اکتیو در لحظه t در فاز p می‌باشند. مجموعه خطوط متصل به گره k با $\Delta(k)$ نشان داده شده است. قید رعایت محدوده‌ی جریان و

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

توان کشیده شده از خطوط شبکه، $I_p^{b.t}$ برابر جریان شاخه b فاز p در لحظه t ام می‌باشد که باید کمتر از حد بیشینه‌ی آن باشد. نهایتاً مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی در بلوک کمینه و استاندارد محاسبه‌شده است.

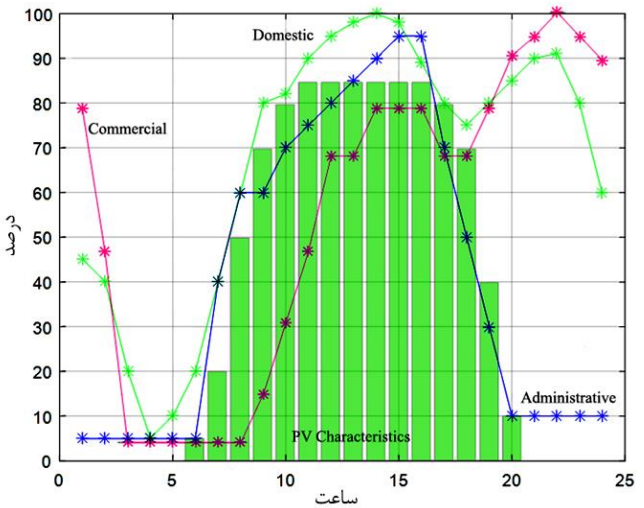
٤. نتایج

شبیه‌سازی بر روی بخشی از شبکه فشار ضعیف نیروگاه فتوولتاییک جرقویه اصفهان که شامل یک تغذیه‌کننده ولتاژ متوسط ۲۰ کیلوولت و شش تغذیه‌کننده فشار ضعیف ۴۰۰ ولت و ۱۶ شین فشار ضعیف می‌باشد، انجام شده است. دیاگرام شبکه در شکل (۵) نشان داده شده است. شبیه‌سازی در ماژول برنامه‌نویسی DPL نرم‌افزار DigSILENT v15.1 و برای بازه یک روز یا ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است. مدل بار دینامیکی شامل بار روزانه برای سه بخش اداری، تجاری و خانگی می‌باشد و ساعات تولید PV در شکل (۶) نشان داده شده است. اطلاعات بار الکتریکی، شین و خطوط شبکه در جداول (۱) آمده است.



شکل ۵. دیاگرام تک‌خطی شبکه تغذیه‌کننده‌ها

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]



شکل ۶. تولید توان PV برای یک بازه ۲۴ ساعته و منحنی بار روزانه (اداری،تجاری، خانگی) (نتایج پژوهش)

جدول ۱. مشخصات بار شبکه(نتایج پژوهش)

شین	توان بیشینه(کیلووات), $\mathrm{Cos}\varphi$=0.95						جمع (کیلووات)
	فاز						
	a		**b**		**c**		
3	28	D	25	A	19	C	72
4	30	C	50	D	40	A	120
5	12	A	21	C	12	D	45
6	18	A	20	C	30	D	68
7	50	C	61	A	65	D	176
8	43	D	21	A	37	C	101
9	16	C	29	D	15	A	60
10	14	D	15	D	21	C	50
11	2	D	15	C	12	D	29
12	36	C	12	D	28	D	76
13	25	D	18	C	22	C	65
14	16	D	21	D	32	D	69
15	11	A	12	C	10	D	33
16	19	D	18	C	17	C	54
جمع	**320**		**338**		**360**		**1018**

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

تلفات بار شبکه در ۲۴ ساعت شبانه‌روز معادل ۴۱۶.۸۴۵ کیلووات ساعت و کل تلفات سالانه در ۸۷۶۰ ساعت برابر ۱۵۲.۱۵۲ مگاوات ساعت محاسبه‌شده است. حروف A,D,C در جدول (۱) و شکل (۶)، به معنای مدل بار اداری، خانگی و تجاری می‌باشد. برای مثال طبق جدول (۱)، شین ۱۶ فاز C حداکثر ۱۷ کیلووات مصرف دارد و از مدل بار C یا تجاری پیروی می‌کند. برای محاسبه بار نهایی فاز C شین ۱۶ در زمان t ام، بیشینه‌ی بار معادل ۱۷ کیلووات در درصد زمان t ام مدل بار اداری ضرب می‌شود. برای مقایسه و اعتبار سنجی نتایج در این پژوهش، دو سناریو فرض شده است. سناریوی اول: تقسیم بهینه توان بر روی نیروگاه فتوولتاییک انجام‌نشده باشد و سناریوی دوم: مدل پیشنهادی تقسیم بهینه توان در بین فازهای فتوولتاییک را انجام داده باشد. جدول (۲) مشخصه‌ی هارمونیک جریان فتوولتاییک موجود در شین‌هایی خود را نشان می‌دهد. این مشخصه امکان بررسی اثر هارمونیک جریان را بر روی شین‌های فتوولتاییک فراهم می‌کند. مکان منابع فتوولتاییک در این هارمونی‌ها شین ۱۶، ۱۴، ۱۳، و ۱۲ می‌باشد. la، lb و lc به ترتیب پارامترهای ثابت هماهنگ برای سه فاز نامتعادل می‌باشد.

جدول ۲. تلفات در تغذیه‌کننده فشار ضعیف و مشخصه‌ی هماهنگ جریان فتوولتاییک(نتایج پژوهش)

اتلاف توان (کیلووات)							
ساعت (h)	هارمونیک	la,lb lc(h)%	تغذیه 1	تغذیه 2	تغذیه 4	تغذیه 5	تغذیه 6
1	3	33.33	0.40	0.20	0.51	1.21	0.28
2	5	20	0.06	0.04	0.05	0.15	0.04
3	7	14.28	0.01	0.00	0.02	0.04	0.01
4	9	11.11	0.02	0.01	0.02	0.05	0.01
5	11	9.09	0.06	0.04	0.05	0.15	0.04
6	13	7.69	0.25	0.20	0.21	0.74	0.16
7	15	6.66	0.55	0.47	0.47	1.76	0.37
8	17	5.88	0.95	0.71	0.79	2.77	0.62
9	19	5.26	1.14	0.76	0.92	2.97	0.65
10	21	4.76	1.50	0.89	1.22	3.65	0.80
11	23	4.34	1.91	0.99	1.64	4.44	0.96
12	25	4	2.02	1.07	1.71	4.71	1.01
13	27	7.69	2.27	1.14	1.97	5.23	1.11
14	29	6.66	2.26	1.15	1.94	5.18	1.08
15	31	5.88	2.03	1.01	1.76	4.62	0.93
16	33	5.26	1.50	0.72	1.34	3.43	0.73

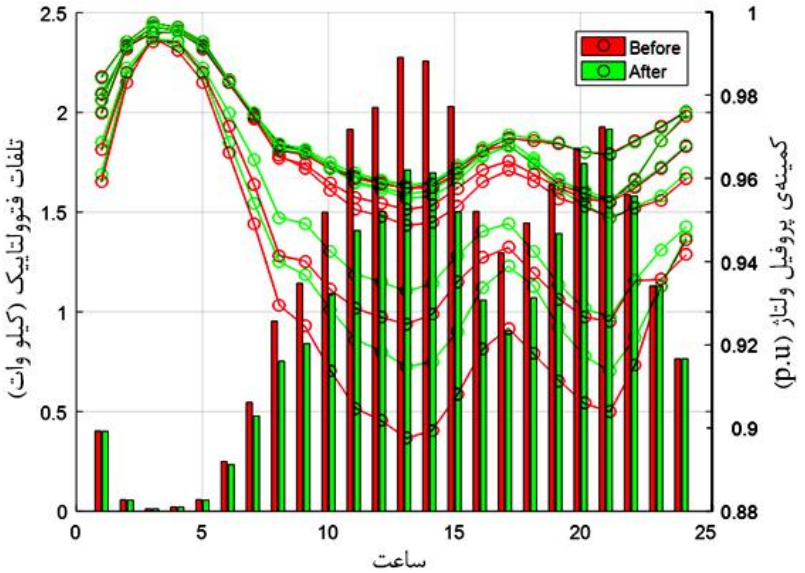
[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

اتلاف توان (کیلووات)							
ساعت (h)	هارمونیک	la,lb lc(h)%	تغذیه 1	تغذیه 2	تغذیه 4	تغذیه 5	تغذیه 6
17	35	4.76	1.29	0.58	1.24	3.04	0.68
18	37	4.34	1.44	0.67	1.53	3.73	0.86
19	39	4	1.64	0.85	1.90	4.77	1.11
20	41	3.70	1.82	0.95	2.10	5.30	1.23
21	43	3.44	1.93	1.00	2.27	5.69	1.31
22	45	3.22	1.59	0.79	1.94	4.76	1.08
23	47	3.03	1.13	0.51	1.56	3.66	0.79
24	49	2.85	0.77	0.35	1.16	2.72	0.58
Total 24 h = 416.845 kWh			**Total 8760 h = 152.152 MWh**				

مأخذ: نتایج تحقیق

چنانچه سناریو اول برقرار گردد: توان سه فاز فتوولتاییک با هم برابر و متناسب با شبکه نامتعادل تنظیم شود، آنگاه، شکل (۷) مقایسه بین تلفات و ولتاژ تغذیه‌کننده شبکه تحت آزمایش، زمانی که خروجی سه فاز نیروگاه خورشیدی فتوولتاییک متعادل باشد، با زمانی که متناسب با شبکه نامتعادل باشد را نشان می‌دهد. در این شکل پروفیل ولتاژ و تلفات نمایش داده شده است. PV_1 روی شین ۱۲ قرار دارد و متعلق به تغذیه‌کننده ۵ می‌باشد، PV_2 بر روی شین ۱۳ قرار دارد و متعلق به تغذیه‌کننده ۱ می‌باشد، PV_3 روی شین ۱۴ قرار دارد و متعلق به تغذیه‌کننده ۳ می‌باشد و درنهایت PV_4 روی شین ۱۶ قرار دارد و متعلق به تغذیه‌کننده ۴ می‌باشد. درصد هارمونیک جریان در هارمونیک n ام از نوع نامتعادل دو پالس می‌باشد. در این گزارش تأثیر خروجی سه فاز نامتعادل PV مشاهده می‌شود. در این شکل، تلفات فتوولتاییک متناسب با شبکه نامتعادل با نمودار ستونی بر حسب کیلووات و کمینه ولتاژ تغذیه‌کننده با توان سه فاز با استفاده از منحنی و دایره مقایسه شده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]



شکل ۷. توان سه فاز فتوولتاییک و تلفات تغذیه‌کننده و ولتاژ تغذیه‌کننده متناسب با شبکه نامتعادل

جدول (۳) نتایج تلفات روزانه و سالانه تغذیه‌کننده را با فرض برابر بودن توان سه فاز فتوولتاییک نشان می‌دهد. معمولاً پنل‌های فتوولتاییک ناخواسته به‌طور نامتعادل نصب می‌شوند. عدم تعادل خروجی سه فاز نیروگاه فتوولتاییک و هماهنگی آن با عدم تعادل شبکه می‌تواند در کاهش تلفات شبکه مؤثر واقع شود. توان خروجی سه فاز هر یک از مجموعه فتوولتاییک با روش متناسب با شبکه نامتعادل استخراج شد. چنانچه تولید هر فاز a، b و c از مجموعه فتوولتاییک در هر ساعت به میزان محاسبه‌شده در این شبیه‌سازی باشد، تلفات و هزینه‌های شبکه کاهش‌یافته و سطح ولتاژ بهینه خواهد شد. جدول (۳) جزئیات دقیق این محاسبات را نشان می‌دهد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

جدول ۳. مقایسه درونی و نتایج توان سه فاز فتوولتاییک هماهنگ با شبکه

ساعت	اتلاف توان (کیلووات)		کمینه ولتاژ p.u		توان تغذیه‌شده به شبکه (کیلووات)
	هماهنگ	**نامتعادل**	**هماهنگ**	**نامتعادل**	
6	5.84458	5.67836	0.96672	0.96928	4.8
7	9.77611	9.04202	0.95000	0.95481	19.2
8	14.62781	12.55782	0.93093	0.94093	48
9	16.70956	13.74958	0.92589	0.93778	67.2
10	20.81599	16.91086	0.91548	0.92961	76.8
11	25.53108	20.75931	0.90652	0.92232	81.6
12	26.89136	21.95871	0.90359	0.91956	81.6
13	29.71891	24.43481	0.89750	0.91472	81.6
14	29.39942	24.18659	0.90115	0.91699	81.6
15	26.41677	21.59797	0.90951	0.92403	81.6
16	20.36591	16.28474	0.92044	0.93466	81.6
17	18.09165	14.47168	0.92542	0.93961	76.8
18	20.53465	16.89871	0.91949	0.93497	67.2
19	23.88636	21.12105	0.91330	0.92560	38.4
20	26.29725	24.88333	0.90789	0.91876	9.6

مأخذ: نتایج تحقیق

اعوجاج هارمونیکی کل با THD نشـــان داده شـــده اســـت. چنانچه توان خروجی ســـه فاز فتوولتاییک هماهنگ با شبکه نامتعادل باشد نسبت به حالتی که هر سه فاز منبع فتوولتاییک با هم برابر باشد، شبکه می‌تواند تولید THD کمتری داشته باشد. در این مدل، بسته به شبکه نامتعادل هر فاز می‌تواند تغییر کند.

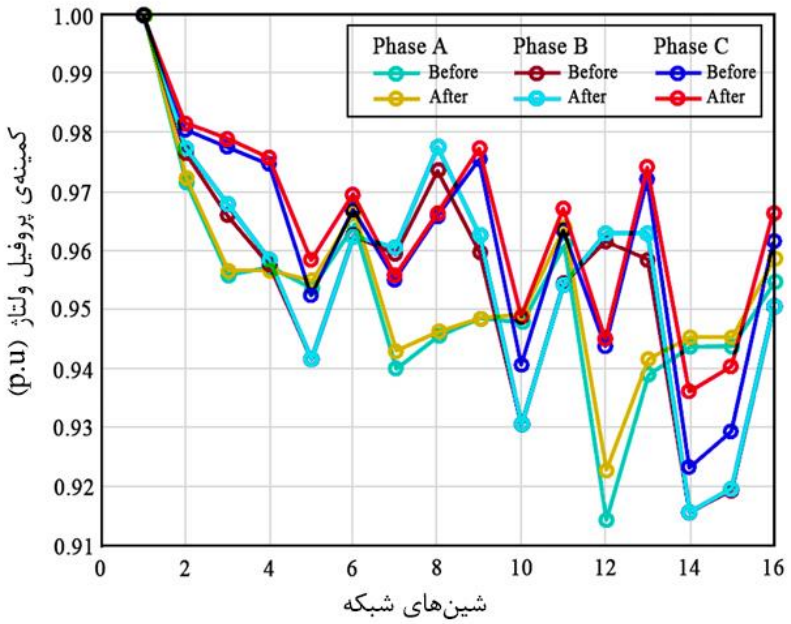
در مقایســه‌ها توان کل در ســه فاز خروجی و در دو حالت برابر می‌باشــد. تفاوت اصــلی این بخش مربوط به خط تقسیم‌بندی بین توان سه فازهای فتوولتاییک می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در این مقاله، اعوجاج الکتریکی نیروگاه فتوولتاییک محلی در شبکه توزیع برق فشار ضعیف نامتعادل چهار سیم، در افق زمانی معین، تحلیل و بهینه‌سازی شده است. شبیه‌سازی بر روی بخشی

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

از نیروگاه فتوولتاییک جرقویه اصفهان، شامل یک تغذیه‌کننده ولتاژ متوسط ۲۰ کیلو ولت و شش تغذیه‌کننده فشار ضعیف ۴۰۰ ولت و ۱۶ شین فشارضعیف انجام شده است. شکل (۸) کمینه‌ی ولتاژ شین‌های شبکه در حالت خروجی سه فاز فتوولتاییک‌ها را با خروجی سه فاز متناسب با شبکه نامتعادل مقایسه کرده است. آنچه در این شکل مشهود است، بهبود فاز پروفیل ولتاژ در قسمت بکارگیری مدل می‌باشد. نکته دیگر آنکه، مجموع توان این فتوولتاییک‌ها در برخی ساعات بسیار ناچیز بوده است.



شکل ۸. مقایسه کمترین پروفیل ولتاژ در فازهای مختلف که خروجی توان سه فاز فتوولتاییک با هم برابر باشد (before) با موقعی که خروجی توان سه فاز متناسب با شبکه نامتعادل (after) تنظیم شود

جدول (۴) مقایسه‌ای بین کمترین ولتاژ شین‌ها در ساعاتی از روز و در دو حالت خروجی برابر فتوولتاییک با خروجی متناسب با شبکه را نشان می‌دهد. نتیجه‌گیری می‌شود: در حالتی که خروجی فتوولتاییک‌ها متناسب با شبکه نامتعادل باشد، در شین ۱۵ شبکه، در فاز c، کمترین ولتاژ متعلق به زمان ۱۳ می‌باشد، که برابر ۰/۹۲ پریونیت است. درحالی که برای حالت خروجی سه فاز

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

برابر فتوولتاییک‌ها در شین ۱۵، در فاز c، کمترین ولتاژ باز مربوط به ساعت ۱۳ می‌باشد که برابر ۰/۹۰ پریونیت می‌باشد. نکته آنکه، در مدل پیشنهادی، پروفیل ولتاژ بهبود پیدا کرده است. هدف یافتن بهترین انتخاب (لزوماً منحصر به فرد نمی‌باشد.) و یا کمینه‌ی انتخاب یک گزینه بهتر نسبت به سایر گزینه‌ها است. بنابراین، کمینه‌سازی تلفات و بهبود ولتاژ و کارایی شبکه در نتیجه بهره‌برداری از نیروگاه‌های فتوولتاییک با مقیاس کوچک متعادل و یا سامانه‌ی نامتعادل با تنظیم متناسب است. چنانچه خروجی سه فاز فتوولتاییک‌ها به صورت نامتعادل و متناسب با شبکه نامتعادل باشد، موجب کاهش تلفات سالانه شده و بهبود ولتاژ را به همراه دارد.

جدول ۴. توان و تلفات سه فاز فتوولتاییک هماهنگ با شبکه نامتعادل

	توان اکتیو (کیلو وات)							اتلاف توان تغذیه کننده (کیلو وات)					
ساعت	PV 1			PV 2			بیشینه						
	a	b	c	a	b	c		1	2	3	4	5	6
6	0.26	0.78	0.16	0.26	0.82	0.12	1.2	0.23	0.20	0.78	0.19	0.68	0.16
7	1.32	0.19	3.29	1.38	2.27	1.15	4.8	0.48	0.47	1.61	0.39	1.53	0.37
8	4.28	1.98	5.74	3.78	4.86	3.37	12	0.75	0.71	2.60	0.59	2.26	0.62
9	6.04	3.93	6.84	5.35	6.33	5.12	16.8	0.84	0.75	2.90	0.62	2.33	0.65
10	7.16	4.79	7.24	6.15	7.09	5.96	19.2	1.09	0.89	3.78	0.81	2.85	0.80
11	7.91	5.52	6.97	6.56	7.36	6.48	20.4	1.41	0.99	4.80	1.11	3.50	0.96
12	7.86	5.45	7.09	6.54	7.39	6.46	20.4	1.50	1.07	5.12	1.17	3.74	1.01
13	7.97	5.66	6.77	6.54	7.32	6.54	20.4	1.71	1.14	5.73	1.38	4.20	1.11
14	7.84	5.79	6.77	6.53	7.28	6.59	20.4	1.70	1.14	5.58	1.35	4.17	1.07
15	7.69	6.15	6.55	6.54	7.15	6.71	20.4	1.50	1.01	4.74	1.20	3.69	0.93
16	7.88	6.02	6.50	6.61	7.16	6.63	20.4	1.06	0.71	3.49	0.87	2.63	0.73
17	7.80	5.62	5.78	6.29	6.72	6.19	19.2	0.90	0.58	3.09	0.81	2.31	0.68
18	7.65	4.65	4.50	5.59	5.92	5.30	16.8	1.07	0.67	3.84	1.10	2.95	0.86
19	5.93	2.04	1.63	3.30	3.50	2.81	9.6	1.39	0.85	5.07	1.59	4.07	1.11
20	2.00	0.22	0.17	0.92	1.12	0.36	2.4	1.74	0.95	6.23	1.98	4.84	1.23

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

	PV 3			PV 4									
	a	b	c	a	b	c							
6	0.70	0.06	0.44	0.84	0.22	0.14	1.2	0.23	0.20	0.78	0.19	0.68	0.16
7	2.15	0.79	1.87	2.35	1.34	1.11	4.8	0.48	0.47	1.61	0.39	1.53	0.37
8	4.56	2.71	4.74	4.86	3.58	3.56	12	0.75	0.71	2.60	0.59	2.26	0.62
9	6.06	4.30	6.44	6.21	5.21	5.37	16.8	0.84	0.75	2.90	0.62	2.33	0.65
10	6.78	4.90	7.52	6.86	5.95	6.39	19.2	1.09	0.89	3.78	0.81	2.85	0.80
11	7.00	5.15	8.24	6.97	6.31	7.12	20.4	1.41	0.99	4.80	1.11	3.50	0.96
12	7.06	5.12	8.22	7.02	6.31	7.08	20.4	1.50	1.07	5.12	1.17	3.74	1.01
13	6.98	5.08	8.34	6.86	6.30	7.24	20.4	1.71	1.14	5.73	1.38	4.20	1.11
14	6.99	5.18	8.23	6.83	6.34	7.23	20.4	1.70	1.14	5.58	1.35	4.17	1.07
15	6.91	5.39	8.09	6.69	6.42	7.29	20.4	1.50	1.01	4.74	1.20	3.69	0.93
16	6.83	5.41	8.16	6.73	6.39	7.28	20.4	1.06	0.71	3.49	0.87	2.63	0.73
17	6.26	4.95	7.99	6.25	5.94	7.02	19.2	0.90	0.58	3.09	0.81	2.31	0.68
18	5.22	3.84	7.74	5.32	5.00	6.48	16.8	1.07	0.67	3.84	1.10	2.95	0.86
19	2.50	1.17	5.92	2.75	2.48	4.37	9.6	1.39	0.85	5.07	1.59	4.07	1.11
20	0.23	0.10	2.07	0.32	0.05	2.03	2.4	1.74	0.95	6.23	1.98	4.84	1.23
	اتلاف کل در سال: 132.642 MWh						اتلاف کل در ۲۴ ساعت: 363.393 kWh						

مأخذ: نتایج تحقیق

چنانچه با رعایت مدل پیشـــنهادی، تلفات کمینه شـــده و ولتاژ و کارایی شـــبکه بهبود یابد، می‌توان نیروگاه فتوولتاییک را متناسب با شبکه معرفی کرد. نیروگاه فتوولتاییک متناسب با شبکه توزیع، در واقع طرحی بر آینده‌ای آگاه از انرژی و محیط زیست بوده که بر توسعه پایدار تاکید دارد؛ این نگاه چنین مطرح می‌شود که تمام موضوعات وابسته به یکدیگر هستند. هر تصمیم‌گیری باید از تمام جنبه‌های آن بررسی شود. نیروگاه فتوولتاییک متناسب با شبکه توزیع به گونه‌ای ساخته(یا انتخاب) می‌شود که نیاز آن به تجهیزات متوازن کننده شبکه حداقل ممکن باشد.

با توجه به اینکه منشأ اصلی بروز و پیدایش عدم تعادل بار در شبکه‌ی توزیع، بخش تغذیه‌کننده‌های فشار ضعیف می‌باشد، بنابراین عملیات جبران سازی به‌منظور متعادل‌سازی بار نیز باید در این تغذیه‌کننده‌ها صورت پذیرد. عدم تعادل واقعی بار در تغذیه‌کننده‌های فشار ضعیف دارای دو ویژگی می‌باشد: نخست، متغیر با زمان بودن میزان و شدت عدم تعادل بار و سپس، پراکنده بودن منشأ عدم تعادل بار در طول تغذیه‌کننده‌ها. بنابراین هرگونه روش متعادل‌سازی

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

می‌باید با توجه به دو ویژگی فوق اعمال گردد. در مدل پیشنهادی متغیرهای زمان و تعادل و یا عدم تعادل رعایت شده است. برای لحاظ نمودن ویژگی دوم می‌باید عملیات جبران سازی در طول تغذیه‌کننده‌ها و در چند نقطه نیروگاه‌های فتوولتاییک انجام شود. بدیهی است که یک گزینه این است که بر روی تمام پایه‌هایی که بار نامتعادل بر روی آن‌ها قرار دارد، عملیات جبران سازی انجام گیرد، این عمل اصطلاحاً به‌عنوان متعادل‌سازی مطلوب و کامل تعریف می‌گردد. واضح است که ملاحظات فنی و اقتصادی این گزینه را برای اجرا مناسب نمی‌داند. بنابراین گزینه دیگری که عملاً استفاده می‌شود، به‌کارگیری جبران ساز بر روی تعدادی از پایه‌های شین‌های تغذیه‌کننده‌ها است که اصطلاحاً به‌عنوان جبران سازی جزئی و یا غیر مطلوب معرفی می‌گردد. مدل پیشنهادی می‌تواند عملکرد تمام شین‌ها را ارتقا دهد، اما چنانچه هدف ایجاد نتیجه بزرگ با فعالیت کمینه باشد، شین ۱۵ شبکه، در فاز c، با کمترین ولتاژ که متعلق به زمان ۱۳ معرفی گردد. چنانچه گزینه‌ی جبران سازی فوق با ملاحظات فنی و اقتصادی هماهنگی داشته باشد، این سؤال اساسی مطرح است که برای یک تغذیه‌کننده مشخص به چه تعداد جبران ساز و در چه شین‌هایی نیاز می‌باشد. بنابراین رعایت مؤلفه‌های ذیل می‌تواند کمک شایانی برای طرح جبران سازی تغذیه‌کننده‌ها داشته باشد. مدل پیشنهادی می‌تواند سه مؤلفه زیر را در یک وضعیت هماهنگ و بهینه ارضاء و برقرار نماید.

- بهبود عملکرد فنی تغذیه‌کننده‌ها از نظر پروفیل و عدم تعادل ولتاژ
- صرفه اقتصادی حاصل به‌واسطه کاهش تلفات انرژی و ظرفیت آزاد شده شبکه
- هزینه ناشی از به‌کارگیری جبران سازها

نظر به نتایج تحقیق جهت راه‌اندازی و اتصال نیروگاه‌های فتوولتاییک به شبکه‌های متداول توزیع برق متناسب با الگوی توسعه پایدار مدیریت هزینه‌های انرژی و مصرف انرژی پیشنهادات ارائه می‌گردد:

- مدیریت مصرف انرژی و آب در نیروگاه‌ها متناسب با مدل‌های استاندارد به‌روزرسانی گردد.
- وزن کلی بار ورودی به شبکه متناسب با تعادل یا عدم تعادل شبکه باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

- نیروگاه طوری مدل شود تا بیشینه‌ی تولید متناسب با ظرفیت انرژی محلی باشد.
- اثرات مخرب زیست‌محیطی حذف یا کمینه گردد.

در بخش‌های گوناگون زیست‌محیطی ازجمله مدیریت پسماند و انرژی در کشور، قوانین و مقررات مناسبی تصویب و ابلاغ‌شده است، اما مواد قانونی مشخصی برای رعایت استانداردهای شبکه انتقال نیروگاه‌های فتوولتاییک به شبکه توزیع واقعی در زمینه‌ی مدیریت مصرف انرژی، بهره‌وری و کاهش تلفات در محل ورود، در نظر گرفته نشده است. ضعف وجود قوانین و مقررات جامع در زمینه‌ی سازگاری نیروگاه‌های فتوولتاییک با شبکه‌ی توزیع واقعی و عدم وجود سامانه‌ی ملی رتبه‌بندی این مهم، توجه جدی دستگاه‌های مسئول و قانون‌گذار را می‌طلبد.

منابع

Demiroren, A. and Yilmaz, U. (2010) "Analysis of change in electric energy cost with using renewable energy sources in Gkceada, Turkey: An island example," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 323–333. doi: 10.1016/j.rser.2009.06.030.

Esmaeili, M. S. and Najafi, G. (2019) "Energy-Economic Optimization of Thin Layer Photovoltaic on Domes and Cylindrical Towers," *International Journal of Smart Grid - ijSmartGrid*, 3(2), pp. 84–91.

Esmaeili shayan, M., Najafi, G. and Banakar, A. ahmad (2017) "Power Quality in Flexible Photovoltaic System on Curved Surfaces," *Journal of Energy Planning And Policy Research*. Journal of Energy Planning And Policy Research, 3(17), pp. 105–136.

Europe, S. P. (2015) "Global market outlook for solar power 2015–2019," *Euoropean Photovoltaic Industry Association, Bruxelles, Tech. Rep*.

Hansen, J. P., Narbel, P. A. and Aksnes, D. L. (2017) "Limits to growth in the renewable energy sector," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 70(November 2016), pp. 769–774.

Heymsfield, E. et al. (2020) "Developing anti-icing airfield runways using surface embedded heat wires and renewable energy," *Sustainable Cities and Society*. Elsevier BV, 52, p. 101712. doi: 10.1016/j.scs.2019.101712.

Islam, M. R. et al. (2019) "Mitigating unbalance using distributed network reconfiguration techniques in distributed power generation grids with services for electric vehicles: A review," *Journal of Cleaner Production*. Elsevier BV, 239, p. 117932. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117932.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]

Medeiros Júnior, M. F. et al. (2015) "A three-phase algorithm for state estimation in power distribution feeders based on the powers summation load flow method," *Electric Power Systems Research*. Elsevier Ltd, 123, pp. 76–84.

Menke, J. H., Bornhorst, N. and Braun, M. (2019) "Distribution system monitoring for smart power grids with distributed generation using artificial neural networks," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. Elsevier Ltd, 113, pp. 472–480.

Mohapatra, A., Bijwe, P. R. and Panigrahi, B. K. (2013) "Optimal power flow with multiple data uncertainties," *Electric Power Systems Research*, 95, pp. 160–167.

Muduli, L., Mishra, D. P. and Jana, P. K. (2018) "Application of wireless sensor network for environmental monitoring in underground coal mines: A systematic review," *Journal of Network and Computer Applications*. Academic Press, pp. 48–67.

Naderipour, A. et al. (2019) "Hierarchical control strategy for a three-phase 4-wire microgrid under unbalanced and nonlinear load conditions," *ISA Transactions*. ISA - Instrumentation, Systems, and Automation Society. doi: 10.1016/j.isatra.2019.04.025.

Park, C., Lee, J. and Sohn, S. Y. (2019) "Recommendation of feeder bus routes using neural network embedding-based optimization," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Elsevier Ltd, 126, pp. 329–341.

Park, S. K. et al. (2018) "Application of a multiple linear regression and an artificial neural network model for the heating performance analysis and hourly prediction of a large-scale ground source heat pump system," *Energy and Buildings*. Elsevier Ltd, 165, pp. 206–215.

Rahman, M. M. et al. (2018) "Global modern monitoring systems for PV based power generation: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, pp. 4142–4158.

Sereeter, B., Vuik, C. and Witteveen, C. (2019) "On a comparison of Newton–Raphson solvers for power flow problems," *Journal of Computational and Applied Mathematics*. Elsevier B.V., 360, pp. 157–169.

Sharma, K. and Saini, L. M. (2017) "Power-line communications for smart grid: Progress, challenges, opportunities and status," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, pp. 704–751.

Tleis, N. D. (2008) *Power Systems Modelling and Fault Analysis*, *Power Systems Modelling and Fault Analysis*. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/B978-0-7506-8074-5.X5001-2.

Tostado, M., Kamel, S. and Jurado, F. (2019) "Developed Newton-Raphson based Predictor-Corrector load flow approach with high convergence rate," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. Elsevier Ltd, pp. 785–792.

Xu, J., Dang, C. and Kong, F. (2017) "Efficient reliability analysis of structures with the rotational quasi-symmetric point- and the maximum entropy methods," *Mechanical Systems and Signal Processing*. Academic Press, 95, pp. 58–76.

Yang, Q. et al. (2020) "Model predictive control of MMC-UPFC under unbalanced grid conditions," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. Elsevier Ltd, pp.117-190.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-31]