

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 فتوولتاییک جرقویه اصفهان

مصطفی اسماعیلی شایان

دانشجوی دکتری مهندسی انرژی‌های تجدید پذیر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

Mostafa.Esmaeili@Modares.ac.ir

غلامحسین 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 قابل توجه داشته است. نظر به استفاده از انرژی خورشیدی در شبکه‌های فشار ضعیف و عدم تعادل بار، بررسی راهکاری باهدف بهینه و جبران‌سازی 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، انجام شده 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.

واژه‌گان کلیدی: جبران‌سازی بار، نیروگاه فتوولتاییک، شبکه توزیع برق، تلفات انرژی سالانه.

تاریخ پذیرش: ۲۴ / ۹ / ۱۳۹۹

تاریخ دریافت: ۱۲ / ۶ / ۱۳۹۹

۱. مقدمه

تعداد ساعات آفتابی سالانه و میزان دریافت انرژی خورشیدی در اغلب مناطق ایران مقدار و پتانسیل فراوانی برای بهره‌برداری دارد. با پیشرفت فناوری، انرژی خورشیدی مستقیماً به الکتریسیته تبدیل شده و این گام بزرگی در دریافت توان از خورشید است. فناوری 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). با این وجود، تنها ۱٪ از کل توان الکتریکی مورد نیاز انسان‌ها که معادل ۱۸/۴۰۰ تراوات 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، افزایش یافته و شبکه‌ی توزیع اصلی را شارژ و تقویت می‌کنند. اما از سوی دیگر، سرازیر شدن نامتوازن این منابع به شبکه توزیع باعث بروز مشکلاتی از جمله: اضافه ولتاژ و اعوجاج هماهنگ جریان می‌گردد. چنانچه پژوهش‌های مختلفی مدیریت بار شبکه و استانداردسازی پایش، ارزیابی و اطمینان بخشی شبکه فشار ضعیف را بر عهده گرفته‌اند (Esmaili 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 راه کارهایی را ارائه کرده

است. هدف نهایی، ارائه پخش بار سریع و دقیق برای شبکه‌های توزیع می‌باشد. نامتعادلی بار در شبکه‌های توزیع عوارض و اثرات سوء فراوانی دارد. در واقع 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 سیم شعاعی با در نظر گرفتن سیم خنثی بر اساس پخش بار رفت و برگشتی ارائه شده است. در این روش سیم خنثی و زمین در نظر گرفته شده و چندین سامانه آزمایشی برای صحت سنجی ارائه شده 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 پیشنهاد شده است. در این مقاله یک اینورتر منع ولتاژ چهار پایه به‌صورت موازی در یک شبکه سه فاز چهار-سیم 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 سیم 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 در شبکه‌های فشار ضعیف ۴ سیم گزارش شده است. پژوهش بنیادی (Tostado, Kamel and Jurado, 2019) مدل جدیدی برای مسئله پخش بار در شبکه‌های چهار سیم 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 تجزیه و تحلیل شبکه در

شرایط نامتعادل در سامانه‌ی نامتقارن معرفی کرده است. همچنین تأثیر نوع اتصال ترانسفورماتورها و نحوه اتصال نقطه صفر و نحوه کنترل ولتاژ پایانه‌های خروجی ارزیابی شده است. پژوهش (Park et al., 2018) از روش پخش بار رفت و برگشت برای تجزیه و تحلیل و مطالعه شبکه توزیع چهار سیم استفاده و بر روی بخشی از یک شبکه توزیع واقعی پیاده کرده است. در پژوهش (Park, Lee and Sohn, 2019) وضعیت کلی بار تغذیه کننده 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 جبران‌سازها در طول تغذیه کننده پیشنهاد شده 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 سیم و نامتعادل، در حضور نیروگاه فتوولتاییک ارزیابی می‌شود. بر این اساس، از پخش بار بهینه استفاده شده 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 می‌باشد. مدل شبه دینامیکی سه حوزه تولید، انتقال و توزیع کاربرد برای نخستین بار در نرم‌افزار دیگ سایلنت 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،

این پژوهش جامع و مدل پیشنهادی می‌تواند مؤلفه‌ی مهمی در تصمیم‌گیری‌های کلان حوزه‌ی برق و انرژی گردد.

۲. مدل‌سازی بار در شبکه‌ی فشار ضعیف نامتعادل

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

$$TRX = A^T ZAM \quad (1)$$

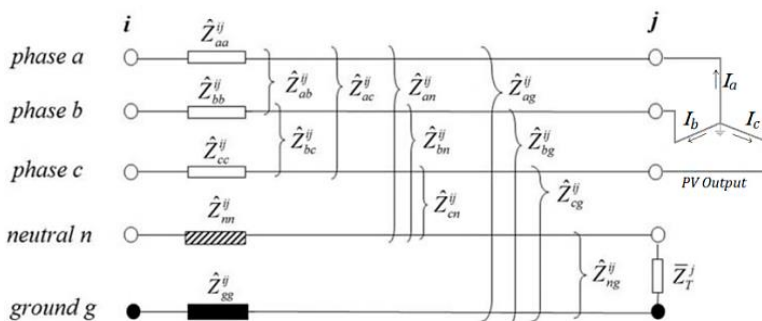
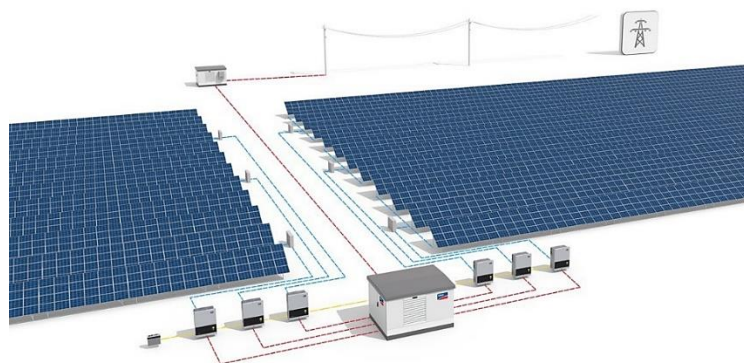
در رابطه (۱)، ماتریس A بالا مثلثی بوده و با توجه به قانون جریان کیرشهف معرفی می‌گردد. این ماتریس رابطه‌ی بین جریان تزریقی $I^{k,t}$ و جریان شاخه‌ی $J^{k,t}$ می‌باشد. در این رابطه $J^{k,t}$ برابر ماتریس جریان شاخه‌ها بوده و در هر لحظه t از رابطه (۲) به دست می‌آید. (Tleis, 2008)

$$J^{k,t} = -AI^{k,t}M \quad \forall t \in h \quad (2)$$

در رابطه (۲) بالانویس t بعد زمانی ماتریس، k دوره تکرار و M برابر ماتریس 5×5 می‌باشد. اطلاعات شاخه‌ها که یک ماتریس 5×5 می‌باشد توسط ماتریس امپدانس Z به صورت رابطه‌ی (۳) استخراج می‌گردد.

$$Z = \text{diag}[\hat{Z}^{01} \dots \hat{Z}^{ij} \dots \hat{Z}^{(b-1)b}] \quad \forall ij \in B \quad (3)$$

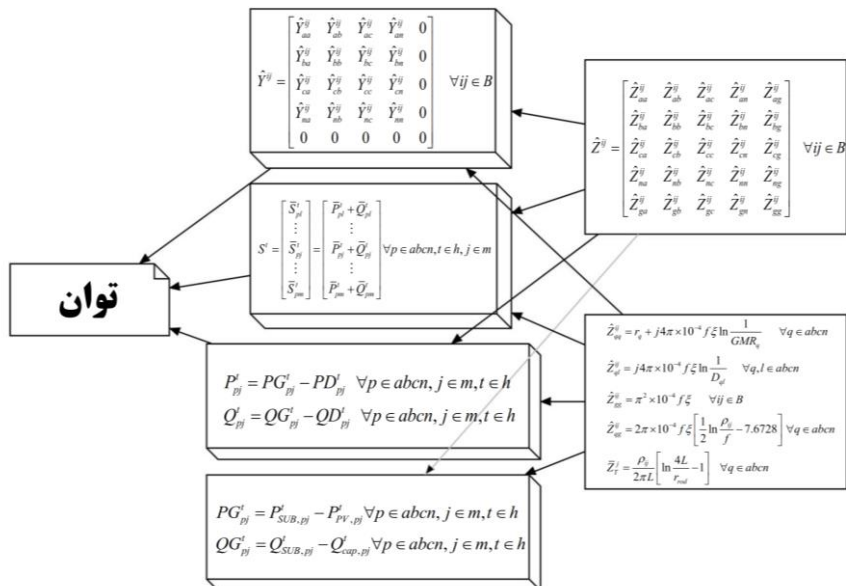
در رابطه (۳) \hat{Z}^{ij} برابر ماتریس 5×5 امپدانس سری خط $i-j$ و بالانویس b نشانگر خطوط موجود شبکه است. این خط شامل سه فاز و یک سیم خنثی می‌باشد.



شکل ۱. شماتیک و دیاگرام شبکه چهار سیم، شامل سه فاز و یک خط خنثی و زمین

شکل (۱) دیاگرام شبکه‌ی چهار سیم 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 فتوولتائیک 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} 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 r_q ft 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 $1/609$ و اگر به Ω/km باشد، برابر $1/1000$ خواهد بود، D_{ql} برابر فاصله بین هادی q و l به ft می‌باشد و f نیز فرکانس با واحد هرترز است. همچنین در این رابطه ρ_{ij} برابر

مقاومت ویژه خط i - j در Ω -m برابر مقاومت بین زمین و سیم خنثی در گره j و L و r_{rod} به ترتیب برابر طول برق گیر زمین و شعاع برق گیر زمین مطابق استاندارد IEC 62305 به متر می باشد. عبارت \bar{Z}_T^{ij} در برق گیرهای تجاری در سامانه های توزیع برابر ۳۰ اهم است. در نهایت برای تکمیل مدل چهار سیم، چند اتصال زمین برای قسمت i - j ادیتمانس شنت اولیه برابر $\bar{Y}^{ij} = j\omega c^{ij}$ به ازای $ij \in B$ و فرکانس زاویه ای $\omega = 2\pi f$ و c^{ij} ماتریس اولیه ظرفیت خازنی می باشد. با این توضیح؛ ظرفیت خازنی خودی و متقابل و توان تزریقی در هر شین بار به ترتیب مطابق با بلوک ۳ و ۴ محاسبه می شود. نهایتاً، توان اکتیو و ری اکتیو به عنوان کل توان تزریقی گره j برای هر فاز در لحظه t به صورت بلوک ۵ به دست می آید. چنانچه توزیع در زمان حضور نیروگاه فتولتاییک باشد، آنگاه بلوک ۶ به عنوان جبران ساز در لحظه t ام استفاده می شود. شکل (۲) مدل پیشنهادی محاسبات توان اکتیو و ری اکتیو را نشان می دهد.



شکل ۲. مدل ریاضی توان لحظه ای اکتیو و ری اکتیو

برای محاسبه گره z 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:

$$\bar{I}_{pj}^{k,t} = - \left(\frac{\bar{S}_{pj}^t}{\bar{V}_{pj}^{k,t} - \bar{V}_{nj}^{k,t}} \right)^* + \sum_{p,r \in abc} \bar{Y}_{pr}^{ij} \bar{V}_{rj}^k \quad \forall j \in B \quad (4)$$

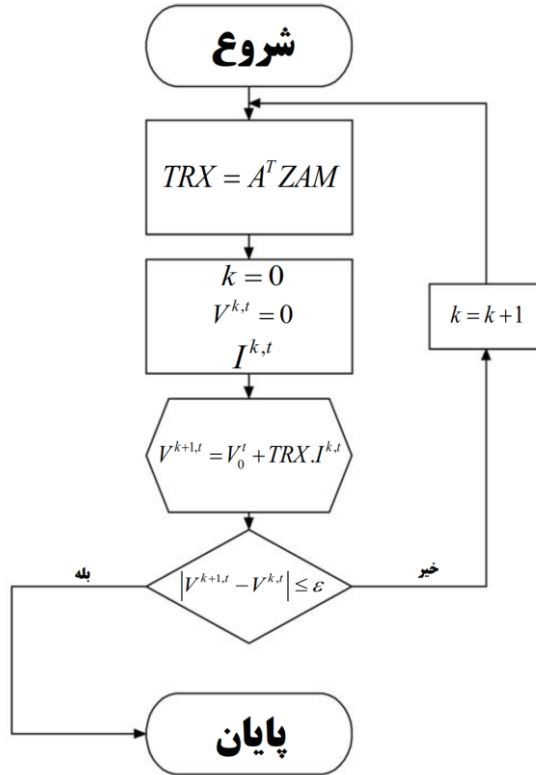
جریان سیم خنثی و زمین در گره z در زمان t ام به دست می‌آید:

$$\bar{I}_{nj}^{k,t} = \bar{I}_{gj}^{k,t} = - \sum_{p \in abc} \bar{I}_{pj}^{k,t} \quad \forall j \in B \quad (5)$$

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

$$|\bar{V}_{pj}^{k+1,t} + \bar{V}_{pj}^{k,t}| \leq \varepsilon \quad \forall j \in m. p \in abc. n. t \in h \quad (6)$$

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.

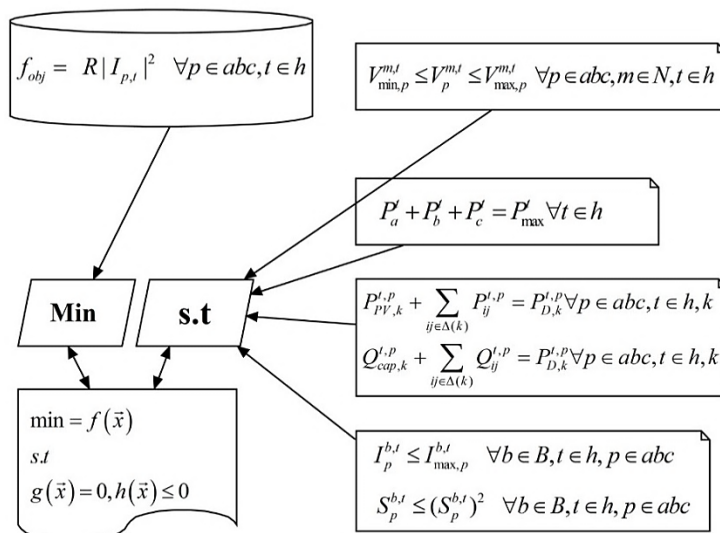


شکل ۳. نمودار روند نمای پخش بار سه فاز چهار سیم

۳. بهینه‌سازی مسئله

در این مقاله، مدل شبه دینامیکی سه حوزه تولید، انتقال و توزیع کاربرد در نرم‌افزار دیگک‌سایلنت و تحت شبکه واقعی نیروگاه‌های فتولتاییک ایران شبیه‌سازی شده و بهینه‌سازی از طریق کد برنامه نویسی DPL بخش Object شبکه و استفاده از دستور getAll و Object و استفاده از دستور printf و دسترسی به اطلاعات خطوط و نوشتن در فایل‌های CSV با 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

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.



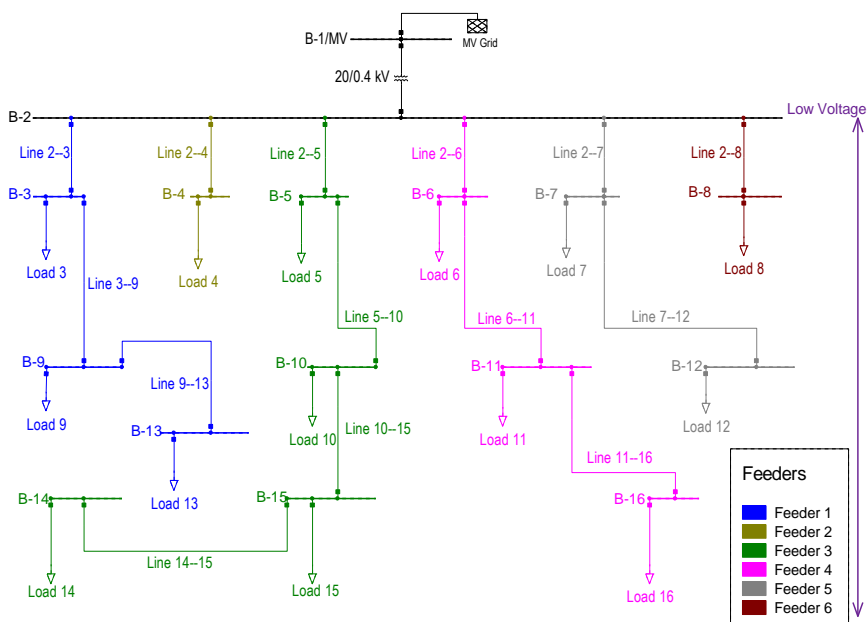
شکل ۴. بهینه‌سازی تحلیل اعوجاج الکتریکی نیروگاه فتوولتائیک بر شبکه توزیع واقعی برق

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 فتوولتائیک می‌باشد. اگر در زمان t مجموع بیشینه توان تولیدی از سه فاز فتوولتائیک برابر P_{max}^t بر حسب 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 فتوولتائیک 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 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

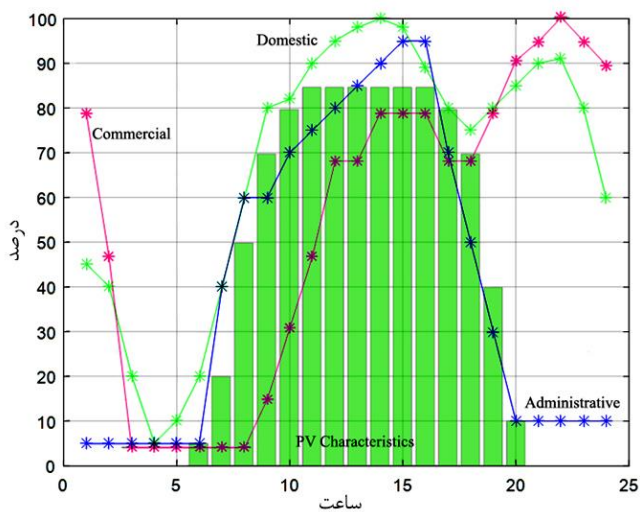
توان کشیده شده از خطوط شبکه، $I_p^{b,t}$ برابر جریان شاخه b فاز p در لحظه t ام می باشد که باید کمتر از حد بیشینه ی آن باشد. نهایتاً مسئله بهینه سازی پیشنهادی در بلوک کمینه و استاندارد محاسبه شده است.

۴. نتایج

شبیه سازی بر روی بخشی از شبکه فشار ضعیف نیروگاه فتولتائیک جرقویه اصفهان که شامل یک تغذیه کننده ولتاژ متوسط ۲۰ کیلوولت و شش تغذیه کننده فشار ضعیف ۴۰۰ ولت و ۱۶ شین فشار ضعیف می باشد، انجام شده است. دیاگرام شبکه در شکل (۵) نشان داده شده است. شبیه سازی در ماژول برنامه نویسی DPL نرم افزار 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 می باشد 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 تک خطی شبکه تغذیه کننده ها



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) $\cos \varphi = 0.95$						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

تلفات بار شبکه در ۲۴ ساعت شبانه‌روز معادل ۴۱۶۸۴۵ کیلووات ساعت و کل تلفات سالانه در ۸۷۶۰ ساعت برابر ۱۵۲.۱۵۲ مگاوات ساعت محاسبه شده 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 انجام نشده 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. I_{lc} به ترتیب پارامترهای ثابت هماهنگ برای سه فاز نامتعادل می‌باشد.

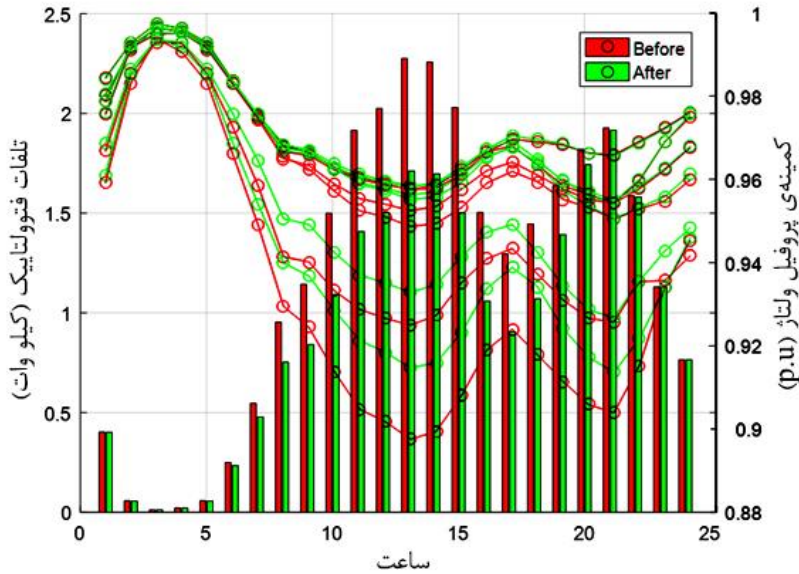
جدول ۲. تلفات در تغذیه‌کننده فشار ضعیف و مشخصه‌ی هماهنگ جریان فتوولتاییک (نتایج پژوهش)

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

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

مأخذ: نتایج تحقیق

چنانچه سناریو اول برقرار گردد: توان سه فاز فتوولتائیک با هم برابر و متناسب با شبکه نامتعادل تنظیم شود، آنگاه، شکل (۷) مقایسه بین تلفات و ولتاژ تغذیه کننده شبکه تحت آزمایش، زمانی که خروجی سه فاز نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک 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 تغذیه کننده ۵ می‌باشد، PV_2 بر روی شین ۱۳ قرار دارد و متعلق به تغذیه کننده ۱ می‌باشد، PV_3 روی شین ۱۴ قرار دارد و متعلق به تغذیه کننده ۳ می‌باشد و در نهایت PV_4 روی شین ۱۶ قرار دارد و متعلق به تغذیه کننده 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 فتوولتائیک متناسب با شبکه نامتعادل با نمودار ستونی بر حسب کیلووات و کمینه ولتاژ تغذیه کننده با توان سه فاز با استفاده از منحنی و دایره مقایسه شده است.



شکل ۷. توان سه فاز فتولتاییک و تلفات تغذیه کننده و ولتاژ تغذیه کننده متناسب با شبکه نامتعادل

جدول (۳) نتایج تلفات روزانه و سالانه تغذیه کننده را با فرض برابر بودن توان سه فاز فتولتاییک نشان می دهد. معمولاً پنل های فتولتاییک ناخواسته به طور نامتعادل نصب می شوند. عدم تعادل خروجی سه فاز نیروگاه فتولتاییک و هماهنگی آن با عدم تعادل شبکه می تواند در کاهش تلفات شبکه مؤثر واقع شود. توان خروجی سه فاز هر یک از مجموعه فتولتاییک با روش متناسب با شبکه نامتعادل استخراج شد. چنانچه تولید هر فاز a ، b و c از مجموعه فتولتاییک در هر ساعت به میزان محاسبه شده در این شبیه سازی باشد، تلفات و هزینه های شبکه کاهش یافته و سطح ولتاژ بهینه خواهد شد. جدول (۳) جزئیات دقیق این محاسبات را نشان می دهد.

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

ردیف	اتلاف توان (کیلووات)		کمینه ولتاژ p.u		توان تغذیه شده
	هماهنگ	نامتعادل	هماهنگ	نامتعادل	به شبکه (کیلووات)
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

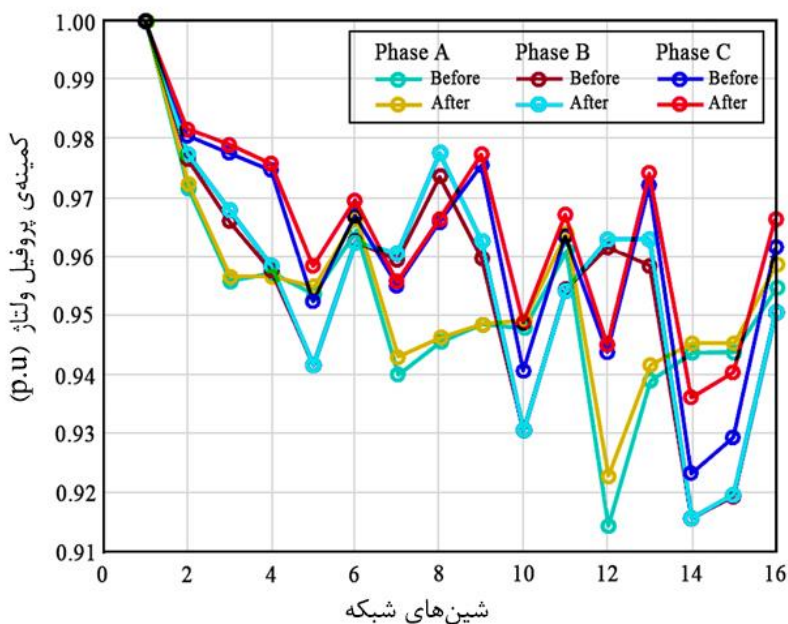
اعوجاج هارمونیک کل با THD نشان داده شده است. چنانچه توان خروجی سه فاز فتوولتاییک هماهنگ با شبکه نامتعادل باشد نسبت به حالتی که هر سه فاز منبع فتوولتاییک با هم برابر باشد، شبکه می‌تواند تولید THD کمتری داشته باشد. در این مدل، بسته به شبکه نامتعادل هر فاز می‌تواند تغییر کند.

در مقایسه‌ها توان کل در سه فاز خروجی و در دو حالت برابر می‌باشد. تفاوت اصلی 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

از نیروگاه فتولتاییک جرقویه اصفهان، شامل یک تغذیه کننده ولتاژ متوسط ۲۰ کیلو ولت و شش تغذیه کننده فشار ضعیف ۴۰۰ ولت و ۱۶ شین فشار ضعیف انجام شده است. شکل (۸) کمینه‌ی ولتاژ شین‌های شبکه در حالت خروجی سه فاز فتولتاییک‌ها 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 فتولتاییک‌ها در برخی ساعات بسیار ناچیز بوده است.



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

جدول (۴) مقایسه‌ای بین ولتاژ شین‌ها در ساعاتی از روز و در دو حالت خروجی برابر فتولتاییک با خروجی متناسب با شبکه را نشان می‌دهد. نتیجه‌گیری می‌شود: در حالتی که خروجی فتولتاییک‌ها 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

برابر فتوولتاییک‌ها در شین ۱۵، در فاز c، کمترین ولتاژ باز مربوط به ساعت ۱۳ می‌باشد که برابر ۰/۹۰ پرینیت 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)																		
	توان اکتیو (کیلو وات)						بیشینه												
	PV 1			PV 2			1		2		3		4		5		6		
	a	b	c	a	b	c													
3																			
4																			
5																			
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						

	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 ۲۴ ساعت: 363.393 kWh							اتلاف کل در سال: 132.642 MWh						

مأخذ: نتایج تحقیق

چنانچه با رعایت مدل پیشنهادی، تلفات کمینه شده و ولتاژ و کارایی شبکه بهبود یابد، می توان نیروگاه فتولتاییک را متناسب با شبکه معرفی کرد. نیروگاه فتولتاییک متناسب با شبکه توزیع، در واقع طرحی بر آینده ای آگاه از انرژی و محیط زیست بوده که بر توسعه پایدار تاکید دارد؛ این نگاه چنین مطرح می شود که تمام موضوعات وابسته به یکدیگر هستند. هر تصمیم گیری باید از تمام جنبه های آن بررسی شود. نیروگاه فتولتاییک متناسب با شبکه توزیع به گونه ای ساخته (یا انتخاب) می شود که نیاز آن به تجهیزات متوازن کننده شبکه حداقل ممکن باشد.

با توجه به اینکه منشأ اصلی بروز و پیدایش عدم تعادل بار در شبکه ی توزیع، بخش تغذیه کننده های فشار ضعیف می باشد، بنابراین عملیات جبران سازی به منظور متعادل سازی بار نیز باید در این تغذیه کننده ها صورت پذیرد. عدم تعادل واقعی بار در تغذیه کننده های فشار ضعیف دارای دو ویژگی می باشد: نخست، متغیر با زمان بودن میزان و شدت عدم تعادل بار و سپس، پراکنده بودن منشأ عدم تعادل بار در طول تغذیه کننده ها. بنابراین هر گونه روش متعادل سازی

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 فتوولتائیک 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 فتوولتائیک به شبکه‌های متداول توزیع برق متناسب با الگوی توسعه پایدار مدیریت هزینه‌های انرژی و مصرف انرژی پیشنهادت 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.

- نیروگاه طوری مدل شود تا بیشینه‌ی تولید متناسب با ظرفیت انرژی محلی باشد.
 - اثرات مخرب زیست‌محیطی حذف یا کمینه گردد.
- در بخش‌های گوناگون زیست‌محیطی از جمله مدیریت پسماند و انرژی در کشور، قوانین و مقررات مناسبی تصویب و ابلاغ شده 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.
- Esmacili, 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.
- Esmacili 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," *European 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.
- Heymfield, 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.

- 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.
- Sreeter, 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.