

## آنالیز تأثیر عدم تعادل ناشی از تولیدات سیستم‌های فتوولتائیک بر شبکه توزیع نامتعادل فشار ضعیف چهار سیمه شیراز

حسین کریمیان فرد<sup>(۱)</sup> - حسین حقیقت<sup>(۲)</sup>

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده برق، واحد جهرم، دانشگاه آزاد اسلامی، جهرم، ایران

(۲) استادیار - دانشکده برق، واحد جهرم، دانشگاه آزاد اسلامی، جهرم، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۲۵

**خلاصه:** به کارگیری منابع انرژی پراکنده در شبکه‌های قدرت و به‌ویژه در سیستم توزیع در سال‌های اخیر از محبوبیت و رشد قابل توجهی برخوردار شده است. نظر به استفاده روزافزون از منابع انرژی خورشیدی در شبکه‌های فشار ضعیف، وجود راهکاری برای هماهنگی و کنترل این منابع به منظور کاهش تلفات انرژی سالانه شبکه و بهبود پروفیل ولتاژ شبکه ضروری می‌باشد. در این مقاله بهینه‌سازی و هماهنگی منابع فتوولتائیک محلی در شبکه توزیع فشار ضعیف نامتعادل چهار-سیمه، در یک افق زمانی معین، پیشنهاد و بررسی شده است. شبیه‌سازی بر روی بخشی از شبکه فشار ضعیف شهر شیراز انجام شده است. دو سناریو بررسی شده است: در سناریوی اول خروجی منابع انرژی پراکنده سه فاز متعادل (و بدون کنترل) منظور گردیده است و در سناریوی دوم وضعیتی منظور شده که خروجی این منابع سه فاز نامتعادل باشد. اثر این دو سناریو بر تلفات انرژی سالانه شبکه مورد نظر به تفصیل بررسی شده است.

**کلمات کلیدی:** پخش بار نامتعادل چهار-سیمه، شبکه توزیع نامتعادل، منابع فتوولتائیک.

## Analysis of Unbalanced Photovoltaic Systems Generation on Four-Wire Unbalance Distribution System of Shiraz

Hossein Karimianfard<sup>(1)</sup> - Hossein Haghghat<sup>(2)</sup>

(1) MSc - Department of Electrical Engineering, Jahrom Branch, Islamic Azad University, Jahrom, Iran  
karimianfard@gmail.com

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Jahrom Branch, Islamic Azad University, Jahrom, Iran  
hosein.haghghat@gmail.com

**Abstract:** The use of distributed energy resources in power grids and in particular in the distribution system has gained noticeable popularity and growth in recent years. Given the increasing use of solar energy resources in low voltage grids, an appropriate strategy to coordinate and control these resources is necessary in order to reduce annual grid energy losses and improve grid voltage profiles. In this paper, the optimization and coordination of local photovoltaic resources in a four-wire unbalanced low voltage distribution network is proposed and investigated for a given time horizon. The simulation is performed on a part of Shiraz low voltage network. Two scenarios are investigated: in the first scenario balanced output of three phase energy resources which are dispersed and uncontrolled, is considered. In the second scenario a situation is analyzed in which the output levels of these resources are unbalanced. The effect of these two scenarios on the annual energy losses of the network in question is thoroughly examined and discussed.

**Index Terms:** Four-wire unbalanced load flow, unbalanced distribution system, Photovoltaic cells.

## ۱- مقدمه

امروزه به علل مختلف از جمله کاهش آلودگی محیط زیست، استفاده از انرژی خورشیدی به صورت محلی افزایش یافته است. اما از سوی دیگر، سرازیر شدن توان این منابع به شبکه توزیع باعث بروز مشکلاتی شده است که برای نمونه می‌توان به اضافه ولتاژ و نیز افزایش هارمونیک جریان اشاره کرد. بنابراین ارزیابی و پایش دائمی وضعیت شبکه فشار ضعیف برای اطمینان از برقراری استانداردهای بهره‌بردار ضروری می‌باشد [۱]. آنالیز و بررسی آثار منابع فتوولتائیک (PV) بر شبکه توزیع از موضوعات جذاب و دامنه‌دار مهندسی قدرت است. رویکرد غالب مطالعات استفاده از پخش بار بهینه سه یا تک فاز است. نمونه‌هایی به شرح زیر ذکر می‌شود. مرجع [۱] یک پخش بار بهینه سه فاز نامتعادل در شبکه سه سیمه را ارائه و توان اکتیو و راکتیو سه فاز هر منبع را، برای کاهش نامتعادلی ولتاژ بهینه‌سازی می‌کند، مرجع [۲] 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 کرده‌اند. مرجع [۳] و [۴] روشی‌هایی را بر اساس یک ماتریس شبه متقارن برای پخش بار در شبکه‌های توزیع ارائه کرده است. هدف این مراجع ارائه پخش بار سریع و دقیق برای شبکه‌های توزیع می‌باشد. در مرجع [۵] یک الگوریتم پخش بار عمومی برای شبکه‌های سه فاز چهار سیمه 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 سیستم آزمایشی برای صحت سنجی آن ارائه شده است. مرجع [۶] یک فرمولاسیون جدید برای شبکه‌های سه فاز چهارسیمه را با استفاده از مدل نیوتن-رافسون بر اساس مدل تزریق جریان به هر گره ارائه کرده است. این روش پیشنهادی هر دو سیم خنثی و زمین را در نظر گرفته است. در مرجع [۷] یک استراتژی جدید برای متعادل کردن جریان بار نامتعادل پیشنهاد شده است. در این مقاله از یک اینورتر منبع ولتاژ چهار پایه به صورت موازی در یک شبکه سه فاز چهار-سیمه به منظور تعادل بار استفاده شده است. مرجع [۸] کاربرد جبران‌سازی کیفیت توان را در ریزشبکه هوشمند نشان داده است. جبران‌ساز در نظر گرفته شده در این مرجع برای هر سیستم تولید پراکنده (DG) در ریزشبکه که شامل دو اینورتر چهار فاز سری-موازی باشد به منظور بالا بردن کیفیت توان کاربرد دارد. در مرجع [۹] پیشنهاد تبدیل مدار شبکه توزیع چهار سیمه را به پنج سیمه داده‌اند. در این مقاله از سیم پنجم که به عنوان خنثی ارائه شده است، برای حمل جریان بازگشتی نامتعادل استفاده شده است. همچنین نشان داده شده که تبدیل شبکه چهار-سیمه به پنج سیمه موجب بالا رفتن ایمنی خواهد شد. در مرجع [۱۰] از کنترل‌کننده یکپارچه پخش بار (UPFC) برای تنظیم کردن ولتاژ و تعادل جریان فازها در شبکه‌های فشار ضعیف چهار سیمه بهره برده‌اند. همچنین شبیه‌سازی‌ها را با در نظر گرفتن نفوذ گسترده PVها در شبکه چهار سیمه انجام داده‌اند. مرجع [۱۱] یک فرمولاسیون جدید برای مسئله پخش بار در شبکه‌های چهار سیمه ارائه داده است که شامل هادی‌های زمین و خنثی می‌باشد. در این فرمولاسیون روش نیوتن-رافسون برای

حل معادلات غیرخطی تزریق جریان استفاده شده است. مرجع [۱۲] نرم افزاری جهت تجزیه و تحلیل شبکه در شرایط نامتعادل در سیستم نامتقارن معرفی کرده است. همچنین تأثیر نوع اتصال ترانسفورماتورها و نحوه اتصال نقطه صفر و نحوه کنترل ولتاژ ترمینال‌های خروجی ارزیابی شده است مرجع [۱۳] از روش پخش بار رفت و برگشتی برای تجزیه و تحلیل و مطالعه شبکه توزیع چهار-سیمه استفاده کرده است و اثرات روی بخشی از یک شبکه توزیع واقعی پیاده کرده است. در مرجع [۱۴] وضعیت کلی بار یک فیدر در شبکه واقعی و در طول یک دوره زمانی معین، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و برای اصلاح و متعادل‌سازی یک روش کلی و مؤثر جایابی بهینه جبران‌سازها در طول فیدر ارائه شده است. در مرجع [۱۶] نویسندگان تأثیرات سیستم PV سه فاز را بر روی شبکه توزیع واقعی انگلستان تحت شرایطی که خطای اتصال کوتاه در شبکه رخ دهد، بررسی کرده‌اند. در مرجع [۱۷] نیز نویسندگان مدیریت ولتاژ را به وسیله نفوذ بالای منابع PV در شبکه‌های توزیع واقعی پیشنهاد داده‌اند. در این مقاله نشان داده شده است که منابع PV می‌تواند تأثیر مثبت و منفی روی ولتاژ شبکه داشته باشد که به منظور رفع تأثیرات منفی، روش کاهش ولتاژ حفاظت (CVR) را پیشنهاد داده‌اند. در [۱۸] نیز نویسندگان تأثیر تحلیل اقتصادی بازار محلی را بر رویکرد تصادفی تولید PV در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف (LV) مورد بررسی قرار داده‌اند. از مرور تحقیقات پیشین در موضوع مقاله پیشنهادی می‌توان به این نتیجه رسید که در این مقالات عدم تعادل در تولیدات منابع PV کمتر مورد توجه و بررسی قرار گرفته شده و عمدتاً شبکه متعادل فرض شده است. از سوی دیگر، برخی از مقالات مرور شده مدل‌سازی شبکه نامتعادل را بدون در نظر گرفتن سیم خنثی انجام داده‌اند و نیز بهینه‌سازی روی تلفات توان و یا ولتاژ انجام شده که تمام اینها همزمان در این مقاله در نظر گرفته شده است. در این مقاله وضعیت یک شبکه فشار ضعیف واقعی چهار سیمه و نامتعادل در حضور منابع PV ارزیابی و آنالیز شده است. به همین منظور، از پخش بار بهینه استفاده شده تا نشان داده شود با اضافه شدن قابلیت کنترل بر توان خروجی منابع PV، در یک افق زمانی معین، شاهد کاهش حداکثری تلفات انرژی و بهبود وضعیت پروفیل ولتاژ شبکه خواهیم بود. علاوه، اثر منابع PV در تولید هارمونیک بررسی شده است. در این مقاله از مدل بار نامتعادل سه فاز و متغیر با زمان استفاده شده است. همچنین، یک شبکه فشار ضعیف چهار-سیمه مورد نظر است و هدف نشان دادن این مطلب است که با تنظیم توان هر فاز منابع PV در هر بازه زمانی، می‌توان تلفات انرژی سالانه شبکه را کاهش داد. علاوه، اثر منابع PV و هارمونیک‌های ناشی از آن در شبکه بررسی شده است. نوآوری اصلی این مقاله را می‌توان در موارد زیر دانست: (۱) بررسی و تحلیل اثرات منابع PV غیر متعادل بر روی یک شبکه سه فاز چهار سیمه فشار ضعیف، (۲) پیاده‌سازی مدل بهینه‌سازی پیشنهادی در نرم‌افزار DigSILENT، (۳) مدل‌سازی شبکه واقعی، شامل بارهای خانگی، تجاری و صنعتی با منحنی مصرف مختلف، (۴) در نظر گرفتن یک دوره دینامیکی ۲۴ ساعته با تابش‌های متفاوت برای منابع PV سه فاز.

$$\hat{Z}^{ij} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa}^{ij} & \hat{Z}_{ab}^{ij} & \hat{Z}_{ac}^{ij} & \hat{Z}_{an}^{ij} & \hat{Z}_{ag}^{ij} \\ \hat{Z}_{ba}^{ij} & \hat{Z}_{bb}^{ij} & \hat{Z}_{bc}^{ij} & \hat{Z}_{bn}^{ij} & \hat{Z}_{bg}^{ij} \\ \hat{Z}_{ca}^{ij} & \hat{Z}_{cb}^{ij} & \hat{Z}_{cc}^{ij} & \hat{Z}_{cn}^{ij} & \hat{Z}_{cg}^{ij} \\ \hat{Z}_{na}^{ij} & \hat{Z}_{nb}^{ij} & \hat{Z}_{nc}^{ij} & \hat{Z}_{nn}^{ij} & \hat{Z}_{ng}^{ij} \\ \hat{Z}_{ga}^{ij} & \hat{Z}_{gb}^{ij} & \hat{Z}_{gc}^{ij} & \hat{Z}_{gn}^{ij} & \hat{Z}_{gg}^{ij} \end{bmatrix} \quad \forall ij \in B \quad (4)$$

که امپدانس خودی  $\hat{Z}_{qq}^{ij}$  و امپدانس متقابل  $\hat{Z}_{qj}^{ij}$  به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۱۵]:

$$\begin{aligned} \hat{Z}_{qq}^{ij} &= r_q + j4\pi \times 10^{-4} f \xi \ln \frac{1}{GMR_q} \quad \forall q \in abc \\ \hat{Z}_{qj}^{ij} &= j4\pi \times 10^{-4} f \xi \ln \frac{1}{D_{ql}} \quad \forall q, l \in abc \\ \hat{Z}_{gg}^{ij} &= \pi^2 \times 10^{-4} f \xi \quad \forall ij \in B \\ \hat{Z}_{qe}^{ij} &= 2\pi \times 10^{-4} f \xi \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{\rho_{ij}}{f} - 7.6728 \right] \quad \forall q \in abc \\ \bar{Z}_t &= \frac{\rho_{ij}}{2\pi L} \left[ \ln \frac{4L}{r_{rod}} - 1 \right] \quad \forall q \in abc \end{aligned} \quad (5)$$

در رابطه (۵)  $GMR_q$  برابر شعاع متوسط هندسی هادی  $q$  به  $r_q$ ،  $f$ ،  $\xi$  برابر مقاومت AC هادی  $q$  به  $\Omega/mile$  می‌باشد. ثابت  $\xi$  اگر  $\hat{Z}_{qj}^{ij}$  و  $\hat{Z}_{qj}^{ij}$  به  $\Omega/mile$  باشد برابر  $1/6.09$  و اگر به  $\Omega/km$  باشد، برابر  $1/0.00$  خواهد بود.  $D_{ql}$  نیز برابر فاصله بین هادی  $q$  و  $l$  به  $ft$  می‌باشد و  $f$  نیز فرکانس به هرتر است.  $\rho_{ij}$  برابر مقاومت ویژه خط  $i-j$  در  $\Omega-m$  می‌باشد.  $\bar{Z}_t$  برابر مقاومت بین زمین و سیم خنثی در گره  $z$  می‌باشد، که  $L$  و  $r_{rod}$  به ترتیب برابر طول برقی زمین و شعاع برقی زمین به متر هستند (در اینجا منظور از برق گیر، سیستم مربوط به فرآیند خنثی‌سازی سیم زمین و خنثی است، که می‌بایست برای ساخت دو خط زمین و خنثی از حفره‌های برق گیر استفاده نمود). عبارت  $\bar{Z}_t$  در برقی‌های تجاری در سیستم‌های توزیع تقریباً برابر  $30$  اهم است. در نهایت برای تکمیل مدل چهار سیمه چند گراندی (زمین) برای سکشن  $i-j$  ادیتمانس شنت اولیه برابر  $\bar{Y}^{ij} = j\omega c^{ij} \forall ij \in B$  که  $\omega = 2\pi f$  (فرکانس زاویه‌ای) و  $c^{ij}$  ماتریس اولیه ظرفیت خازنی می‌باشد. پس ظرفیت خازنی خودی و متقابل به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\hat{Y}^{ij} = \begin{bmatrix} \hat{Y}_{aa}^{ij} & \hat{Y}_{ab}^{ij} & \hat{Y}_{ac}^{ij} & \hat{Y}_{an}^{ij} & 0 \\ \hat{Y}_{ba}^{ij} & \hat{Y}_{bb}^{ij} & \hat{Y}_{bc}^{ij} & \hat{Y}_{bn}^{ij} & 0 \\ \hat{Y}_{ca}^{ij} & \hat{Y}_{cb}^{ij} & \hat{Y}_{cc}^{ij} & \hat{Y}_{cn}^{ij} & 0 \\ \hat{Y}_{na}^{ij} & \hat{Y}_{nb}^{ij} & \hat{Y}_{nc}^{ij} & \hat{Y}_{nn}^{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \forall ij \in B \quad (6)$$

حال توان تزریقی در هر باس بار به صورت زیر بدست خواهد آمد.

$$S^t = \begin{bmatrix} \bar{S}_{pl}^t \\ \vdots \\ \bar{S}_{pj}^t \\ \vdots \\ \bar{S}_{pm}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{P}_{pl}^t + j\bar{Q}_{pl}^t \\ \vdots \\ \bar{P}_{pj}^t + j\bar{Q}_{pj}^t \\ \vdots \\ \bar{P}_{pm}^t + j\bar{Q}_{pm}^t \end{bmatrix} \quad \forall p \in abc, t \in h, j \in m \quad (7)$$

دیگر بخشهای مقاله به این شرح است: در بخش دوم مدل‌سازی و روابط ریاضی مطرح می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آنها در بخش سوم ارائه می‌گردد و نتیجه‌گیری در بخش آخر صورت گرفته است.

## ۲- پخش بار در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف

به منظور پخش بار در یک شبکه چهار-سیمه دارای  $m$  باس، یک ماتریس به نام TRX که متشکل از مشخصات امپدانس شاخه‌ها (فاز، سیم خنثی) در فیدر توزیع می‌باشد، تشکیل می‌دهیم [۱۵].

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

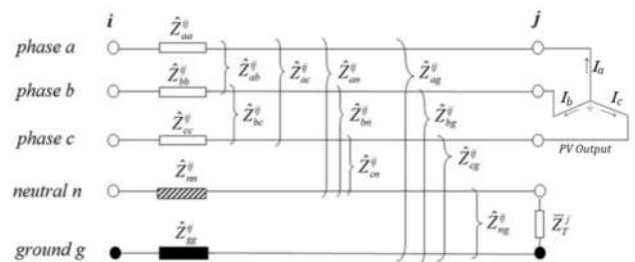
در رابطه بالا، ماتریس  $A$  یک ماتریس بالا مثلثی است و بالانویس  $T$  نشان‌دهنده ترانهاده آن است، که با توجه به قانون جریان کیرشهف (KCL) ساخته می‌شود. این ماتریس رابطه بین جریان تزریقی  $I^{k,t}$  و جریان شاخه‌ها  $J^{k,t}$  می‌باشد [۱۵]. همانطور که گفته شد  $J^{k,t}$  برابر ماتریس جریان شاخه‌ها است که در هر لحظه از رابطه زیر بدست می‌آید.

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

که در رابطه (۲) بالانویس  $t$  نشان‌دهنده بعد زمانی ماتریس  $k$  و نشان‌دهنده دوره تکرار می‌باشد و  $M$  یک ماتریس  $5 \times 5$  است [۱۵]. اطلاعات شاخه‌ها که یک ماتریس  $5 \times 5$  می‌باشد توسط ماتریس امپدانس  $Z$  به صورت زیر بدست می‌آید [۱۵]:

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

در رابطه بالا  $\hat{Z}^{ij}$  برابر ماتریس  $5 \times 5$  امپدانس سری خط  $i-j$  است و بالانویس  $b$  نشانگر خطوط موجود شبکه می‌باشد که این خط شامل سه فاز و یک سیم خنثی طبق شکل (۱) می‌باشد.



شکل (۱): یک شبکه چهار سیمه، شامل سه فاز و یک خط خنثی و سیستم زمین به همراه مدل سه فاز فتوولتائیک

Fig. (1): A four-wire network consisting of three phases and a neutral line and a ground system along with a three-phase photovoltaic model

شکل (۱) نشان‌دهنده یک شبکه ساده چهار سیمه با سیستم زمین می‌باشد. همانطور که مشخص است، این شبکه نمونه شامل سه سیم فاز  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و یک سیم خنثی و سیستم زمین است. مشاهده می‌شود که یک منبع فتوولتائیک به این شبکه سه فاز متصل می‌باشد. رابطه امپدانس  $\hat{Z}^{ij}$  طبق شکل (۱) برابر است با:

تحقیق ولتاژ سه فاز، جریان و اندازه بهینه منابع PV با توجه به اندازه بار نامتعادل سه فاز در هر لحظه از زمان محاسبه می‌شود.

## ۱-۲- مدل‌سازی مسئله بهینه‌سازی

در این مقاله مدل بهینه‌سازی پیشنهادی توسط الگوریتم Interior-Point که در نرم افزار DigSILENT به کار رفته است حل خواهد شد. این الگوریتم، از روش نیوتن برای حل معادلات و قیود غیرخطی و از روش لاگرانژ برای معادلات و قیود برابری خطی و روش فایکو برای نامعادلات خطی استفاده می‌کند که به فرم زیر است:

$$\min = f(\bar{x}) \quad (13)$$

$$\text{s.t: } g(\bar{x})=0, h(\bar{x}) \leq 0$$

که  $g$  قید برابری پخش بار و قید  $h$  قید نابرابری می‌باشد. در ادامه تابع هدف و قیود مساله بهینه‌سازی تعریف می‌شوند.

## ۲-۲- تابع هدف و قیود در نظر گرفته شده

در این مقاله تابع هدف در نظر گرفته شده تلفات توان حقیقی سالانه است، که به صورت زیر برای بازه مطالعه و سه فاز محاسبه می‌شود.

$$f_{\text{obj}} = R \sum_{p \in abc, t \in h} |I_{p,t}|^2 \quad (14)$$

قیود مسئله نیز به صورت روابط زیر مدل‌سازی می‌شود:

**الف) قید ولتاژ،** که می‌بایست ولتاژ فاز مربوطه در لحظه  $t$  در باس  $m$  بین حد در نظر گرفته شده استاندارد باشد:

$$V_{\min,p}^{m,t} \leq V_p^{m,t} \leq V_{\max,p}^{m,t} \quad \forall p \in abc, m \in N, t \in h \quad (15)$$

**ب) قید حداکثر توان قابل بهره‌برداری منابع فتولتائیک** که به صورت زیر می‌باشد. این قید به این منظور است که، مثلاً اگر در زمان  $t$  مجموع حداکثر توان تولیدی از سه فاز PV برابر  $P_{\max}^t$  کیلووات باشد، می‌بایست مجموع توان سه فاز هم برابر آن شود.

$$P_a^t + P_b^t + P_c^t = P_{\max}^t \quad \forall t \in h \quad (16)$$

**ج) قید تعادل توان طبق روابط (۱۷)** که  $P_{\text{cap},k}^{t,p}, P_{\text{PV},k}^{t,p}$  برابر توان حقیقی و راکتیو تولیدی توسط فتولتائیک و خازن در فاز  $p$  ام و لحظه  $t$  ام،  $Q_{ij}^{t,p}, P_{ij}^{t,p}$  برای توان حقیقی و راکتیو عبوری از خطوط و  $Q_{D,k}^{t,p}, P_{D,k}^{t,p}$  بار حقیقی و راکتیو در لحظه  $t$  در فاز  $p$  می‌باشد. مجموعه خطوط متصل به گره  $k$  با  $\Delta(k)$  نشان داده شده است:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{PV},k}^{t,p} + \sum_{ij \in \Delta(k)} P_{ij}^{t,p} &= P_{D,k}^{t,p} \quad \forall p \in abc, t \in h, k \\ Q_{\text{cap},k}^{t,p} + \sum_{ij \in \Delta(k)} Q_{ij}^{t,p} &= P_{D,k}^{t,p} \quad \forall p \in abc, t \in h, k \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

**د) قید رعایت حد جریان و توان کشیده شده از خطوط شبکه** که به صورت زیر است، که  $I_p^{b,t}$  برابر جریان شاخه  $b$  فاز  $p$  در لحظه  $t$  ام می‌باشد که باید کمتر از حد بیشینه آن باشد.

$$I_p^{b,t} \leq I_{\max,p}^{b,t} \quad \forall b \in B, t \in h, p \in abc \quad (18)$$

$$S_p^{b,t} \leq S_{\max}^{b,t} \quad \forall b \in B, t \in h, p \in abc \quad (19)$$

در روابط بالا  $S_p$  و  $S_{\max}$  توان ظاهری فیدر و حداکثر آن و  $I_p$  و  $I_{\max}$  جریان فیدر و حداکثر هستند. در نهایت فرم مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی به طور خلاصه به صورت زیر خواهد شد:

که توان اکتیو و راکتیو به عنوان کل توان تزریقی گره  $z$  برای هر فاز در لحظه  $t$  به صورت زیر بدست می‌آید.

$$P_{pj}^t = PG_{pj}^t - PD_{pj}^t \quad \forall p \in abc, j \in m, t \in h \quad (8)$$

$$Q_{pj}^t = QG_{pj}^t - QD_{pj}^t \quad \forall p \in abc, j \in m, t \in h$$

در رابطه (۸)،  $P_{pj}^t, Q_{pj}^t$  به ترتیب برابر توان تزریقی حقیقی و راکتیو در گره  $z$  ام در زمان  $t$  ام برای فاز  $p$  می‌باشد. نیز،  $PG_{pj}^t, QG_{pj}^t$  به ترتیب برابر تولید توان حقیقی و راکتیو در گره  $z$  ام در زمان  $t$  ام برای فاز  $p$  می‌باشد. و در آخر،  $PD_{pj}^t, QD_{pj}^t$  به ترتیب برابر توان بار اکتیو و راکتیو در گره  $z$  ام در زمان  $t$  ام برای فاز  $p$  می‌باشد.

تولید در باس  $z$  در حضور منابع PV یا جبران‌ساز در لحظه  $t$  ام به صورت زیر می‌باشد.

$$PG_{pj}^t = P_{\text{SUB},pj}^t - P_{\text{PV},pj}^t \quad \forall p \in abc, j \in m, t \in h \quad (9)$$

$$QG_{pj}^t = Q_{\text{SUB},pj}^t - Q_{\text{cap},pj}^t \quad \forall p \in abc, j \in m, t \in h$$

در رابطه (۹)،  $P_{\text{SUB},pj}^t, Q_{\text{SUB},pj}^t$  به ترتیب برابر توان اکتیو و راکتیو تزریق شده از طریق پست به گره  $z$  ام در زمان  $t$  ام برای فاز  $p$  می‌باشد. همچنین  $P_{\text{PV},pj}^t, Q_{\text{cap},pj}^t$  به ترتیب برابر توان حقیقی PV و توان راکتیو خازن در گره  $z$  ام در زمان  $t$  ام برای فاز  $p$  است.

به طور خلاصه الگوریتم زیر را برای پخش بار سه فاز چهار سیمه می‌توان نوشت:

## الگوریتم پیشنهادی محاسبه پخش بار سه فاز در شبکه توزیع

گام اول) محاسبه ماتریس  $TRX = A^T ZAM$

گام دوم) تنظیم  $k=0$  و  $V^{k,t}=0$

گام سوم) محاسبه جریان تزریقی  $I^{k,t}$

گام چهارم) به روزرسانی ولتاژ  $V^{k+1,t} = V_0^t + TRX \cdot I^{k,t}$

گام پنجم) بررسی شرط همگرایی  $|V^{k+1,t} - V^{k,t}| \leq \epsilon$  در صورت برقراری، پایان و در غیر اینصورت  $k=k+1$  بازگشت به گام سوم.

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

$$\bar{I}_{pj}^{k,t} = - \left( \frac{\bar{S}_{pj}^t}{\bar{V}_{pj}^{k,t} - \bar{V}_{nj}^{k,t}} \right)^* + \sum_{p,r \in abc} \bar{Y}_{pr} \bar{V}_{rj}^k \quad \forall j \in B \quad (10)$$

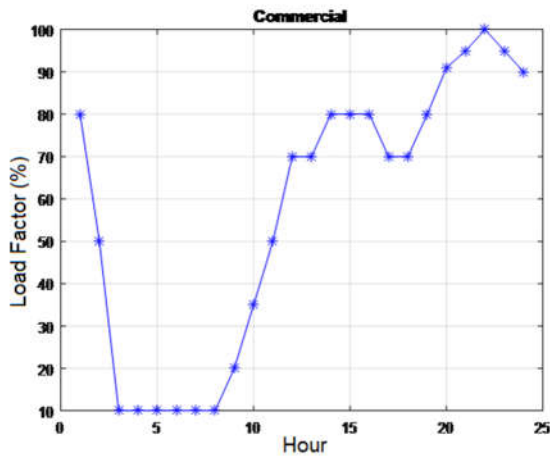
که جریان سیم خنثی و زمین گره  $z$  در زمان  $t$  ام به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\bar{I}_{nj}^{k,t} = \bar{I}_{gj}^{k,t} = - \sum_{p \in abc} \bar{I}_{pj}^{k,t} \quad \forall j \in B \quad (11)$$

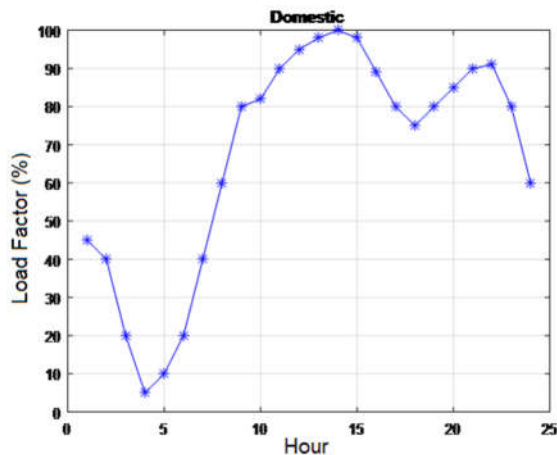
شرط همگرایی ولتاژ برای سه فاز و سیم خنثی به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$|\bar{V}_{pj}^{k+1,t} - \bar{V}_{pj}^{k,t}| \leq \epsilon \quad \forall j \in m, p \in abc, n, t \in h \quad (12)$$

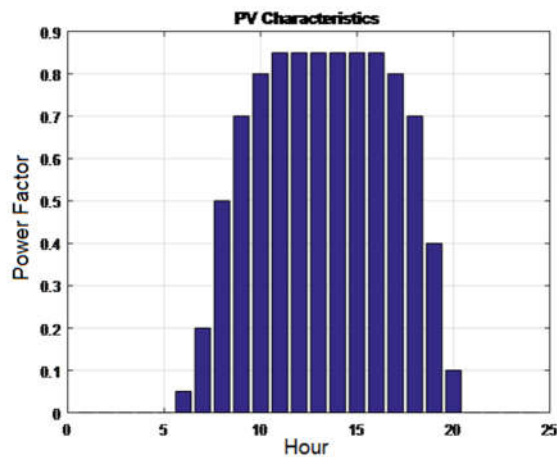
وقتی ولتاژ و جریان گره‌ها بدست آمد، جریان شاخه‌ها و در نتیجه تلفات سیستم در مسیر سیم خنثی هم بدست خواهد آمد. در این



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۳): منحنی بار روزانه (الف) اداری، (ب) تجاری، (ج) خانگی و (د) تولید توان PV برای یک بازه ۲۴ ساعته

Fig. (3): Daily load curve (a) administrative, (b) commercial, (c) domestic and (d) PV production for a 24 hour period

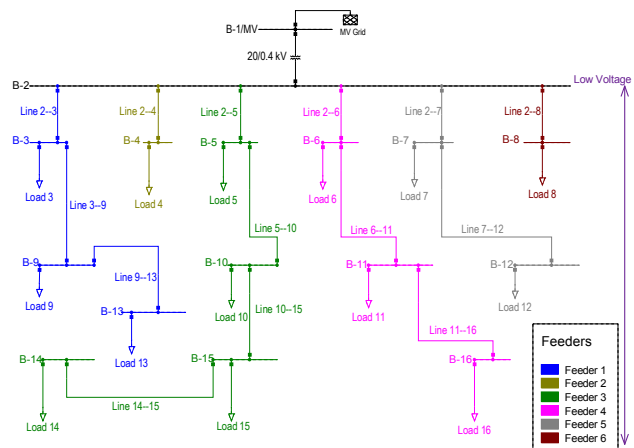
$$\min (14) \quad (20)$$

$$\text{s.t: } (15)-(18)$$

که رابطه (۱۴) برابر تابع هدف مسئله و رابطه (۱۵) الی (۱۸) قیود در نظر گرفته شده در مسئله بهینه‌سازی می‌باشد، که قبلاً هر یک از آن‌ها ارائه و معرفی شده بود.

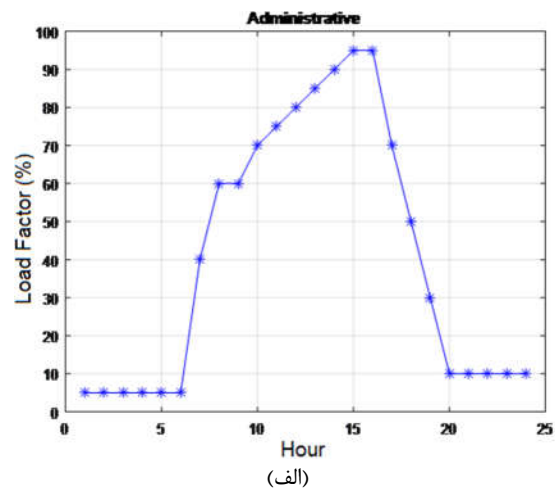
### ۳- نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی بر روی بخشی از شبکه فشار ضعیف شیراز (خاتونک) که شامل یک فیدر ولتاژ متوسط (۲۰ کیلوولت) و شش فیدر فشار ضعیف (۴۰۰ ولت) و ۱۶ باس فشار ضعیف می‌باشد، انجام شده است. دیاگرام شبکه در شکل (۲) نشان داده شده است. شبیه‌سازی در نرم‌افزار DigSILENT و ماژول برنامه نویسی آن (DPL) انجام شده است. مدل بار دینامیکی شامل بار روزانه برای سه بخش اداری، تجاری و خانگی می‌باشد و ساعات تولید PV در شکل (۳) نشان داده شده است. اطلاعات بار ساعتی هر باس و اطلاعات خطوط در جداول (۱ و ۲) آمده است. طبق شکل (۳) مشخص است که شبیه‌سازی برای بازه یک روز یا ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است.



شکل (۲): دیاگرام تک خطی شبکه مطالعه

Fig. (2): A single-line diagram of the test system



(الف)

Table (2): Load Data  
جدول (۲): اطلاعات بار شبکه

شین	مجموع توان (kW)						
	0.95 ضریب توان، kW <sub>max</sub> بیشترین توان حقیقی 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
مجموع	320		338		360		1018

Table (1): Line Data  
جدول (۱): اطلاعات خطوط شبکه

فیدر	شین i-j	مقاومت ohm	راکتانس ohm	طول m
1	2--3	0.02395	0.01979	75
	3--9	0.02044	0.01688	64
	9--13	0.03800	0.03140	119
2	2--4	0.04184	0.03457	131
	2--5	0.06899	0.05700	216
	5--10	0.03194	0.02638	100
3	10--15	0.04152	0.03430	130
	15--14	0.02778	0.02295	87
4	2--6	0.04120	0.03404	129
	6--11	0.02874	0.02375	90
	11--16	0.03353	0.02770	105
5	2--7	0.04184	0.03457	131
	7--12	0.06388	0.05277	200
6	2--8	0.05589	0.04618	175

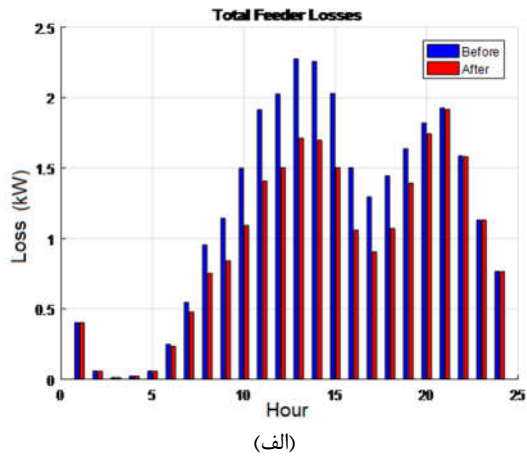
Table (3): Losses in low voltage feeder (equal power in three PV phases)

جدول (۳): تلفات فیدر فشار ضعیف (تقسیم مساوی توان در هر سه فاز PVها)

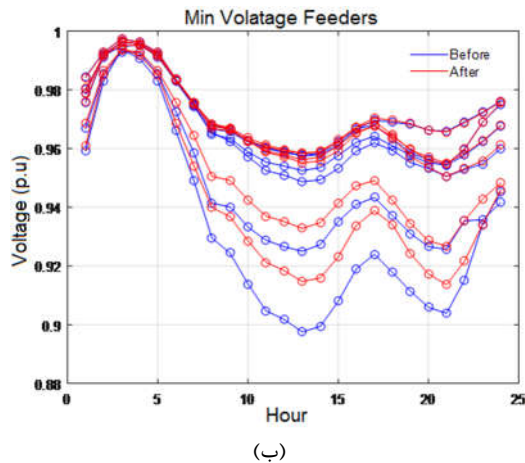
h زمان	تلفات به توان					
	فیدر 1	فیدر 2	فیدر 3	فیدر 4	فیدر 5	فیدر 6
1	0.402445	0.198326	1.403524	0.505008	1.206863	0.276961
2	0.058119	0.036929	0.204496	0.049699	0.147565	0.038526
3	0.012671	0.004342	0.030931	0.016190	0.035572	0.007174
4	0.021831	0.009772	0.070768	0.022272	0.052490	0.012258
5	0.058119	0.036929	0.204496	0.049699	0.147565	0.038526
6	0.249534	0.201301	0.829935	0.206543	0.742695	0.155815
7	0.545997	0.472143	1.840940	0.470867	1.763059	0.367159
8	0.953991	0.707706	3.324729	0.794092	2.772475	0.623372
9	1.143179	0.755396	3.950321	0.921420	2.965159	0.647176
10	1.498662	0.887728	5.178167	1.223016	3.646553	0.797939
11	1.914717	0.991982	6.495583	1.636787	4.436739	0.959640
12	2.024567	1.072631	6.875477	1.710677	4.712543	1.012344
13	2.274752	1.144012	7.596308	1.967255	5.232527	1.107966
14	2.257369	1.146144	7.403232	1.936684	5.177312	1.075249
15	2.029590	1.008920	6.383435	1.757439	4.623306	0.933790
16	1.503099	0.715418	4.896112	1.342448	3.428261	0.731669
17	1.294311	0.582176	4.341856	1.239664	3.040047	0.677505
18	1.444859	0.670038	5.128727	1.526141	3.726463	0.859950
19	1.637663	0.851125	6.107804	1.899523	4.765728	1.108734
20	1.819961	0.954396	6.841437	2.098597	5.300932	1.234435
21	1.926589	0.996168	7.213374	2.271603	5.688690	1.313146
22	1.586564	0.791186	5.789912	1.944143	4.759657	1.084615
23	1.130290	0.512787	3.815151	1.556057	3.659823	0.794894
24	0.765086	0.347884	2.459200	1.161775	2.722240	0.575788
	تلفات کل در ۲۴ ساعت = 416.845 kWh			تلفات کل در ۸۷۶۰ ساعت = 152.152 MWh		

در نظر گرفته‌ایم. فرض اول آن که تقسیم بهینه توان روی PV انجام نشود و فرض دوم همان مدل پیشنهادی مقاله است، که قبلاً به آن اشاره شد. در واقع یک تقسیم بهینه توان در بین فازهای PV می‌باشد. جدول (۳) نتایج تلفات روزانه و سالانه فیدر را با فرض اینکه توان سه فاز PV ها برابر باشد نشان می‌دهد. از این جدول برای مقایسه نتایجی که در ادامه ذکر می‌شود، استفاده می‌کنیم. بررسی‌های میدانی و تجربی نشان داده که PV ها ناخواسته به طور نامتعادل نصب می‌شوند

توجه شود که در جدول (۲) حرف A به معنای مدل بار اداری (طبق شکل (۳)) می‌باشد. برای مثال طبق جدول (۲)، باس ۳ فاز b حداکثر ۲۵ کیلو وات مصرف دارد و از مدل بار A یا اداری می‌باشد. برای محاسبه بار نهایی فاز b باس ۳ در زمان t ام، به این صورت عمل می‌شود که، حداکثر بار آن که برابر ۲۵ کیلووات است (طبق جدول ۲) ضربدر درصد زمان t ام مدل بار اداری می‌شود. به همین ترتیب C تجاری و D مدل بار خانگی می‌باشد. برای مقایسه نتایج در این مقاله دو فرض را



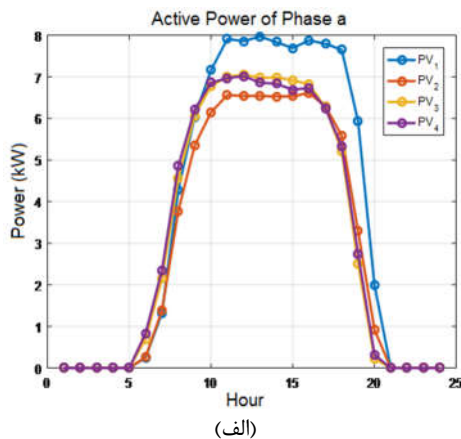
(الف)



(ب)

شکل (۴): مقایسه الف) تلفات فیدر و ب) حداقل ولتاژ فیدر بین حالت PV سه فاز متناسب با شبکه نامتعادل (بعد) با حالت PV سه فاز با توان‌های برابر (قبل)

Fig. (4): Comparing (a) feeder losses and (b) the lowest feeder's voltage of the three-phase PV proportional to the unbalance network (after) with the three-phase PV with equal powers (before)



(الف)

[۱۱]. اگر خروجی سه فاز PVها به صورت نامتعادل و متناسب با شبکه نامتعادل باشد، چه قدر در بهبود تلفات شبکه مؤثرتر خواهند بود. جدول (۴) داده‌های هارمونیک جریان PVهای موجود در شین‌هایی است که در آن قرار دارند را نشان می‌دهد، تا بتوان اثر هارمونیک جریان را در شین‌هایی که روی آن‌ها PV قرار دارد بررسی نمود. شکل (۴) مقایسه بین نتایج حاصله، با فرض اینکه توان سه فاز PVها با هم برابر باشند و توان سه فاز PVها متناسب با شبکه نامتعادل تنظیم شود، انجام شده است.

در شکل (۴) پروفیل ولتاژ و تلفات نمایش داده شده است. PV<sub>1</sub> روی باس ۱۲ قرار دارد و متعلق به فیدر ۵ می‌باشد. PV<sub>2</sub> روی باس ۱۳ قرار دارد و متعلق به فیدر ۱ می‌باشد، PV<sub>3</sub> روی باس ۱۴ قرار دارد و متعلق به فیدر ۳ می‌باشد و در نهایت PV<sub>4</sub> روی باس ۱۶ قرار دارد و متعلق به فیدر ۴ است. درصد هارمونیک جریان در هارمونیک n ام از نوع نامتعادل دو پالس در نظر گرفته شده است که اطلاعات آن در جدول (۴) آمده است. I<sub>a</sub>, I<sub>b</sub> و I<sub>c</sub> به ترتیب پارامترهای ثابت هارمونیک برای سه فاز نامتعادل می‌باشد.

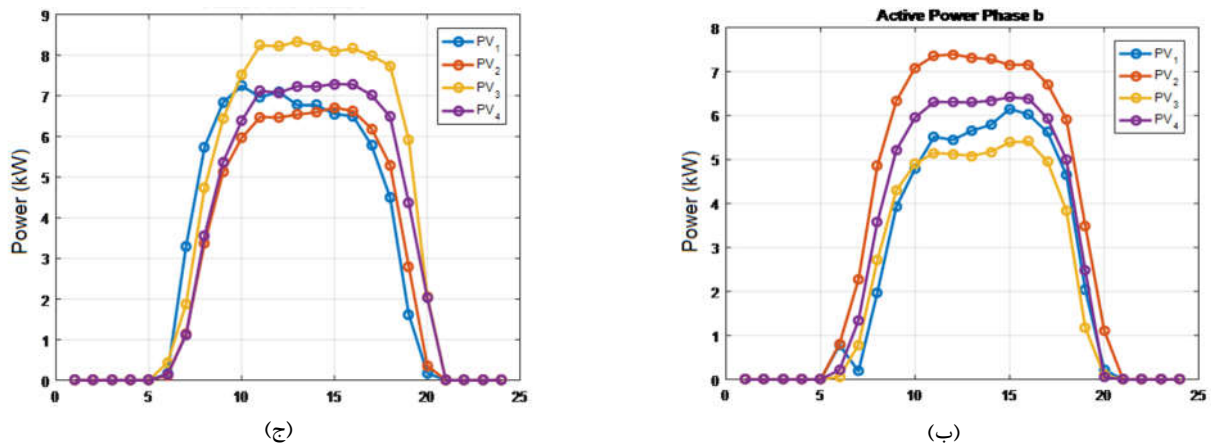
Table (4): Harmonic data of PVs

جدول (۴): داده‌های هارمونیک جریان PVها

مکان منابع PV برابر باس ۱۲, ۱۳, ۱۴, ۱۶					
$i$	مرتبه هارمونیک	$I_a, I_b$ $I_c(h)$ %	$i$	مرتبه هارمونیک	$I_a, I_b$ $I_c(h)$ %
1	3	33.33	13	27	7.69
2	5	20	14	29	6.66
3	7	14.28	15	31	5.88
4	9	11.11	16	33	5.26
5	11	9.09	17	35	4.76
6	13	7.69	18	37	4.34
7	15	6.66	19	39	4
8	17	5.88	20	41	3.70
9	19	5.26	21	43	3.44
10	21	4.76	22	45	3.22
11	23	4.34	23	47	3.03
12	25	4	24	49	2.85

شکل (۴) مقایسه‌ای بین تلفات و ولتاژ فیدر شبکه آزمایشی زمانی که خروجی سه فاز منابع PV متعادل باشد، با زمانی که متناسب با شبکه نامتعادل باشد را نشان می‌دهد. در این شکل تاثیر خروجی سه فاز نامتعادل PV بخوبی مشاهده می‌شود.

شکل (۵) توان خروجی سه فاز هر یک از PVها را با روش پیشنهادی متناسب با شبکه نامتعادل را نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که اگر تولید هر فاز a, b و c از PVها در هر ساعت به میزان محاسبه شده در این شبیه سازی باشد، چه قدر در تلفات سالانه و ولتاژ به صرفه خواهد شد. جدول (۵) جزئیات دقیق این خروجی‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۵): خروجی بهینه توان سه فاز PV ها متناسب با شبکه نامتعادل در هر

ساعت از روز، الف) فاز a، ب) فاز b و ج) فاز c

Fig. (5): The optimal output of three-phase PV power proportional to the unbalanced network at any time of the day, (a) phase a, (b) phase b, and (c) phase c

Table (5): The results of three-phase PV power proportional to the unbalanced network

جدول (۵): نتایج توان سه فاز PV متناسب با شبکه نامتعادل

جدول نتایج توان سه فاز PV متناسب با شبکه نامتعادل							
توان حقیقی kW							
h	PV 1			PV 2			Max
	a	b	c	a	b	c	
6	0.255436	0.784653	0.159911	0.26341	0.81516	0.12143	1.2
7	1.31838	0.18792	3.29370	1.38172	2.27102	1.14726	4.8
8	4.28169	1.97932	5.73899	3.77614	4.85581	3.36804	12
9	6.03628	3.92534	6.83830	5.34808	6.32924	5.12264	16.8
10	7.16106	4.79479	7.24399	6.14672	7.08997	5.96324	19.2
11	7.91221	5.51747	6.97004	6.56306	7.35783	6.47898	20.4
12	7.85971	5.44624	7.09377	6.54220	7.39294	6.46471	20.4
13	7.97127	5.65787	6.77045	6.54387	7.31539	6.54053	20.4
14	7.83684	5.78953	6.77322	6.52737	7.27958	6.59285	20.4
15	7.69343	6.15381	6.55243	6.53577	7.15222	6.71185	20.4
16	7.87552	6.02438	6.49993	6.61345	7.15958	6.62689	20.4
17	7.79875	5.62188	5.77927	6.29237	6.71682	6.19076	19.2
18	7.65152	4.65180	4.49654	5.58614	5.91670	5.29709	16.8
19	5.93252	2.04060	1.62675	3.29634	3.49747	2.80613	9.6
20	2.00362	0.22154	0.17483	0.92363	1.11507	0.36128	2.4
Active Power in kW							
h	PV 3			PV 4			Max
	a	b	c	a	b	c	
6	0.698730	0.064635	0.436635	0.83574	0.22216	0.14210	1.2
7	2.14587	0.78675	1.86738	2.34803	1.34287	1.10909	4.8
8	4.55740	2.70609	4.73639	4.85688	3.58432	3.55878	12
9	6.06342	4.30060	6.43575	6.21125	5.21416	5.37456	16.8
10	6.77751	4.90165	7.52038	6.85946	5.95499	6.38548	19.2
11	7.00327	5.15100	8.24495	6.96966	6.30872	7.12148	20.4
12	7.05728	5.12495	8.21687	7.01776	6.30702	7.07506	20.4
13	6.97666	5.08434	8.33787	6.86432	6.29915	7.23632	20.4
14	6.98848	5.17760	8.23282	6.83410	6.33968	7.22601	20.4
15	6.91475	5.39109	8.09333	6.69299	6.41570	7.29114	20.4
16	6.82516	5.41252	8.16189	6.73316	6.38766	7.27910	20.4
17	6.25946	4.95189	7.98835	6.24615	5.93726	7.01654	19.2
18	5.22398	3.83956	7.73610	5.32024	4.99654	6.48314	16.8
19	2.50489	1.17367	5.92112	2.74988	2.47624	4.37381	9.6
20	0.22939	0.09957	2.07103	0.31923	0.05243	2.02833	2.4



Table (6): Comparing equal three phase powers with the unbalanced case

جدول (۶): مقایسه بین نتایج توان سه فاز برابر PV با توان متناسب با شبکه نامتعادل

ساعت	تلفات توان kW		کمترین ولتاژ p.u		توان حقیقی تزریق شده kW
	برابر	نا برابر	برابر	نا برابر	
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	<b>29.71891</b>	<b>24.43481</b>	<b>0.89750</b>	<b>0.91472</b>	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

Table (7-): Losses in the low voltage feeder, assuming the outputs of the three phases of the PV are proportional to the unbalanced network

جدول (۷): تلفات در فیدر فشار ضعیف با فرض توان سه فاز PV متناسب با شبکه نامتعادل

ساعت	تلفات توان kW					
	فیدر					
	1	2	3	4	5	6
1	0.401316	0.198327	1.319105	0.490086	1.117605	0.276933
2	0.056517	0.036929	0.195966	0.048833	0.138423	0.038526
3	0.012627	0.004342	0.029814	0.015452	0.033141	0.007174
4	0.021755	0.009772	0.068098	0.021942	0.050421	0.012258
5	0.056517	0.036929	0.195966	0.048833	0.138423	0.038526
6	0.234639	0.201290	0.782387	0.188200	0.679823	0.155831
7	0.478362	0.472009	1.610840	0.393262	1.534183	0.367123
8	0.752455	0.707203	2.597125	0.588603	2.256744	0.623082
9	0.841329	0.754430	2.895376	0.620491	2.331963	0.646543
10	1.092438	0.886337	3.779413	0.814098	2.852551	0.796908
11	1.408070	0.990187	4.799346	1.111778	3.500462	0.958040
12	1.502547	1.070661	5.117503	1.172385	3.743520	1.010661
13	1.711317	1.141808	5.726541	1.376989	4.203094	1.105947
14	1.697197	1.143873	5.576258	1.351246	4.167195	1.073268
15	1.501511	1.006896	4.739014	1.202221	3.692444	0.932037
16	1.058900	0.714133	3.492161	0.872488	2.631548	0.730399
17	0.904371	0.581264	3.089671	0.814259	2.314434	0.676397
18	1.070797	0.669151	3.838364	1.095733	2.945813	0.858615
19	1.392008	0.850467	5.072883	1.588620	4.067107	1.107565
20	1.742616	0.954295	6.234649	1.977657	4.838611	1.233949
21	1.915189	0.996292	6.761602	2.217188	5.293854	1.312834
22	1.580322	0.791259	5.431068	1.891371	4.416564	1.084312
23	1.129756	0.512827	3.576935	1.495756	3.348187	0.794614
24	0.764956	0.347907	2.294167	1.105228	2.451661	0.575609

تلفات کل در ۲۴ ساعت = **363.393 kWh**      تلفات کل در ۸۷۶۰ ساعت = **132.642 MWh**

جدول (۶) نشان دهنده توان‌های تولید شده PV بر روی هر فاز در حالتی که توان PV سه فاز متعادل است را با حالتی که توان سه فاز PV نامتعادل است نشان می‌دهد. بخوبی مشخص است که کل توان تولید شده در هر دو حالت برابر است و فقط اختلاف بین توان سه فاز می‌باشد.

برای نمونه در جدول (۶) در ساعت ۱۳، مجموع توان سه فاز PV برای هر دو حالت برابر ۸۱/۶ کیلووات است، اما حالتی که سه فاز نامتعادل باشد، توان‌های هر فاز متفاوت است و در حالت سه فاز برابر، توان فازها نیز با هم برابر می‌باشد. با مشاهده جدول (۶) در ساعت ۱۳ بخوبی

جدول (۶) نشان دهنده توان‌های تولید شده PV بر روی هر فاز در حالتی که توان PV سه فاز متعادل است را با حالتی که توان سه فاز PV نامتعادل است نشان می‌دهد. بخوبی مشخص است که کل توان تولید شده در هر دو حالت برابر است و فقط اختلاف بین توان سه فاز می‌باشد.

شکل (۶) مقایسه‌ای بین تلفات توان و کمترین ولتاژ موجود در شین‌های شبکه در ساعاتی است که PV به شبکه متصل می‌شود، یعنی از ساعت تقریباً ۶ صبح الی ۸ شب. در این شکل که حالتی که خروجی توان سه فاز PVها با هم برابر باشد با (Before) نشان داده شده و حالتی را که خروجی سه فاز PVها متناسب با شبکه نامتعادل باشد با (After) مشخص شده است. مشاهده می‌شود که در حالت After در این ساعات چه قدر تلفات و ولتاژ بهبود پیدا کرده است. این نکته را باید بار دیگر بیان کرد، که در تمام مقایسه‌ها مجموع توان سه فاز خروجی در هر دو حالت مقایسه برابر می‌باشد، و فقط تقسیم‌بندی بین توان سه فازهای PV می‌باشد که متفاوت خواهد بود.

مشخص است که با مجموع توان برابر اما با تفاوت توان بین فازها، می‌توانیم تلفات توان را از ۲۹ به ۲۴ کیلووات و پروفیل ولتاژ را از ۰/۸۹ به ۰/۹۱ پریونیت برسانیم، که بخوبی این نتایج کارآیی ایده این مقاله را نشان می‌دهد.

جدول (۷) نیز مقایسه‌ای بین تلفات فیدرهای شبکه توزیع پیشنهادی را در دو حالتی که توان سه فاز PV برابر و غیر برابر (با مجموع توان یکسان) باشد، نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در تمام ساعات روز حالتی که توان سه فاز PVها متفاوت است، تلفات فیدر کمتری وجود خواهد داشت.

Table (8): Comparing voltages when PV outputs are equal and when they are proportional to the unbalanced network

جدول (۸): مقایسه بین ولتاژ در حالت خروجی توان برابر PV با حالت متناسب با شبکه نامتعادل

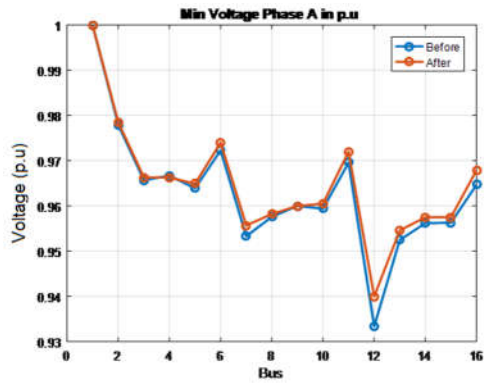
شین	نا برابر			برابر		
	فاز					
	a	b	c	a	b	c
1	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
h	19	7	21	21	7	19
2	0.9785	0.9774	0.9755	0.9779	0.9765	0.9740
h	13	14	13	13	14	13
3	0.9663	0.9679	0.9720	0.9657	0.9659	0.9700
h	21	14	14	13	14	14
4	0.9663	0.9584	0.9676	0.9667	0.9575	0.9661
h	21	13	14	21	13	14
5	0.9649	0.9416	0.9444	0.9639	0.9416	0.9364
h	14	21	13	14	21	13
6	0.9740	0.9624	0.9594	0.9723	0.9625	0.9559
h	14	21	13	14	21	13
7	0.9557	0.9605	0.9409	0.9533	0.9594	0.9401
h	21	14	21	21	14	21
8	0.9582	0.9775	0.9550	0.9576	0.9735	0.9543
h	13	15	21	13	15	21
9	0.9600	0.9626	0.9697	0.9600	0.9597	0.9672
h	21	14	14	21	14	14
10	0.9605	0.9305	0.9317	0.9594	0.9305	0.9208
h	14	21	13	14	21	13
11	0.9720	0.9543	0.9561	0.9696	0.9544	0.9512
h	14	21	13	14	21	13
12	0.9400	0.9629	0.9267	0.9334	0.9616	0.9250
h	21	14	21	21	14	13
13	0.9546	0.9629	0.9654	0.9525	0.9585	0.9627
h	21	14	21	13	14	14
14	0.9575	0.9157	<b>0.9147</b>	0.9562	0.9157	<b>0.8975</b>
h	14	21	13	14	21	13
15	0.9575	0.9194	<b>0.9204</b>	0.9563	0.9194	<b>0.9057</b>
h	14	21	13	14	21	13
16	0.9679	0.9505	0.9552	0.9647	0.9505	0.9487
h	14	21	13	14	21	13

Table (9): Comparing current harmonic (THD%) for equal three-phase power PV and three-phase power proportional to unbalanced network

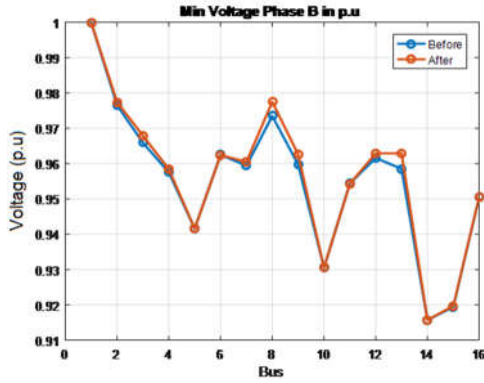
جدول (۹): مقایسه هارمونیک جریان (THD%) با توان سه فاز برابر PV با حالت توان سه فاز متناسب با شبکه نامتعادل

شین	نا برابر			برابر		
	hour=13					
	a	b	c	a	b	c
12	4.24	4.34	4.12	11.43	11.43	11.43
13	3.71	3.73	3.70	10.08	10.08	10.08
14	5.68	5.53	5.28	15.08	15.08	15.08
16	4.35	4.32	4.25	11.54	11.54	11.54

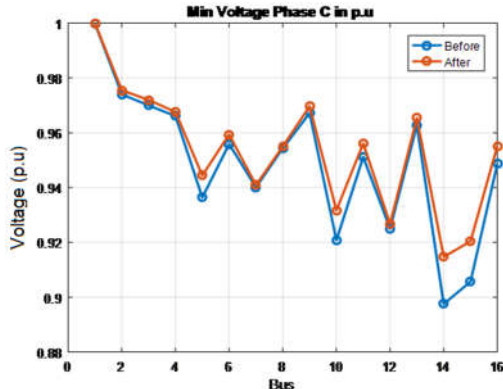
جدول (۹) نتایج هارمونیک در باس‌هایی که PV روی آن می‌باشد را در لحظه ۱۳ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که اعوجاج هارمونیک کل (THD) باس مورد نظر اگر فرض شود که توان خروجی سه فاز PV متناسب با شبکه نامتعادل باشد، (منظور نه لزوماً توان‌ها سه فاز برابر، بلکه بسته به شبکه نامتعادل هر فاز می‌تواند تغییر کند) نیز می‌تواند تولید THD کمتری داشته باشد با حالتی که لزوماً هر سه فاز منبع PV با هم برابر باشد.



(الف)



(ب)

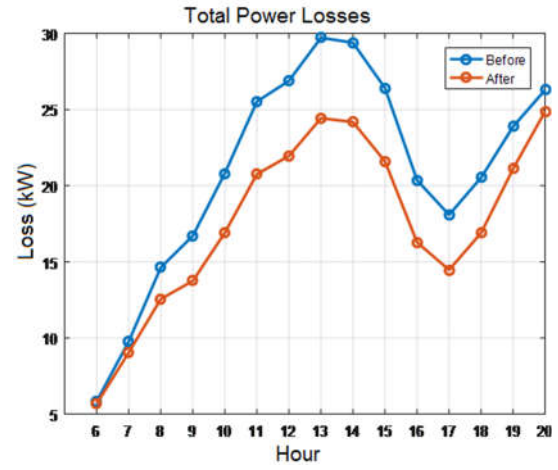


(ج)

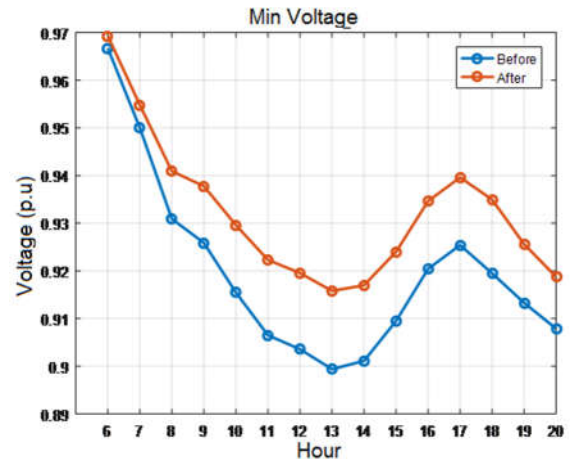
شکل (۷): مقایسه کمترین پروفیل ولتاژ شین های شبکه (الف) در فاز a، (ب) فاز b و (ج) فاز c، زمانی که خروجی توان سه فاز PV با هم برابر باشد (قبل) با موقعی که خروجی توان سه فاز متناسب با شبکه نامتعادل (بعد) تنظیم شود  
 Fig. (7): Comparing the lowest voltage profiles of the buses in (a) phase a, (b) phase b and (c) phase (c) when the outputs of the three phase PV are equal (before) and when the three phase power output is proportional to the unbalanced network (before)

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله کنترل و هماهنگی بهینه منابع PV محلی در یک شبکه چهار-سیمه (سه فاز+خنثی) نامتعادل متغیر با زمان به منظور بهبود ولتاژ و کاهش انرژی سالانه بررسی شد. دو سناریوی اصلی در این مقاله در نظر گرفته شد، که نخست در نظر گرفتن خروجی سه فاز متعادل (بدون کنترل) و خروجی سه فاز نامتعادل می باشد. نشان داده شد که، اگر خروجی سه فاز PV به صورت نامتعادل و متناسب با شبکه نامتعادل باشد، چه قدر در تلفات سالانه و ولتاژ به صرفه خواهد بود.



(الف)



(ب)

شکل (۶): مقایسه بین (الف) تلفات و (ب) حداقل ولتاژ شبکه بین حالت PV سه فاز متناسب با شبکه نامتعادل (بعد) با حالت PV سه فاز با توان های برابر (قبل)

Fig. (6): Comparing (a) losses and (b) the minimum voltage of the three-phase PV proportional to the unbalance network (after) with the three-phase PV with equal powers (before)

شکل (۷) نیز مقایسه ای بین کمترین ولتاژ شین های شبکه را در حالت خروجی سه فاز برابر PVها با خروجی سه فاز متناسب با شبکه نامتعادل را نشان می دهد. مشخص است که در هر فاز پروفیل ولتاژ در حالت After بهبود پیدا کرده است. باید توجه داشت که مجموع توان این PVها در برخی ساعات بسیار ناچیز بوده است؛ همانند ساعات ۶ صبح و ۲۰ (طبق جدول (۵)).

در جدول (۸) نیز مقایسه ای بین کمترین ولتاژ شین در ساعاتی از روز در دو حالت خروجی برابر PV با خروجی متناسب با شبکه انجام شده است. برای نمونه مشاهده می شود در حالتی که خروجی PVها متناسب با شبکه نامتعادل باشد، در شین ۱۵ شبکه، در فاز c، کمترین ولتاژ متعلق به زمان ۱۳ می باشد، که برابر ۰/۹۲ پریونیت است، که برای حالت خروجی سه فاز برابر PVها، در شین ۱۵، در فاز c، کمترین ولتاژ باز هم مربوط به ساعت ۱۳ است که برابر ۰/۹۰ پریونیت می باشد. این در حالی است که در روش پیشنهادی پروفیل ولتاژ بهبود پیدا کرده است.

از دیگر یافته‌های مهم می‌توان به این نکته اشاره نمود که با کمیته‌سازی تلفات و بهبود ولتاژ در نتیجه بهره‌برداری از PVهای با مقیاس کوچک سیستم نامتعادل هم می‌توان با تنظیم متناسب، در جهت بهبود کارایی شبکه گام برداشت. در نهایت روش پیشنهادی بر روی شبکه واقعی (شیراز) و با نرم افزار DigSILENT آزمایش شد که نتایج کارایی روش پیشنهادی را نشان داد.

### References

- [1] L. R. Araujo, D. R. R. Penido, S. Carneiro, J. L. R. Pereira, "A three-phase optimal power-flow algorithm to mitigate voltage unbalance", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 28, No. 4, pp. 2394–2402, Oct. 2013 (doi: 10.1109/TPWRD.2013.2261095).
- [2] A. R. Baran Jr, T. S. P. Fernandes, "A three-phase optimal power flow applied to the planning of unbalanced distribution networks", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 74, pp. 301–309, Jan. 2016 (doi:10.1016/j.ijepes.2015.07.004).
- [3] De Oliveira-De Jesus PM, Alvarez MA, Yusta JM "Distribution power flow method based on a real quasi-symmetric matrix", *Electric Power Systems Research*, Vol. 95, pp.148–159, Feb. 2013 (doi:10.1016/j.eprsr.2012.08.011).
- [4] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, G. X. Luo, "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 3, No. 2, pp. 753–762, 1988 (doi:10.1109/59.192932).
- [5] C. Ciric, A. Padilha, L. Ochoa, "Power flow in four-wire distribution networks-general approach", *Proceeding of the IEEE/*, Vol. 1, 893, Denver, CO, USA, June 2004 (doi:10.1109/PES.2004.1372952).
- [6] D. R. R. Penido, L. R. Araujo, J. L. R. Pereira, P. A. N. Garcia, S. Carneiro, "Four wire newton-raphson power flow based on the current injection method", *Proceeding of the IEEE/PSCE*, Vol. 1, pp. 239–242, New York, NY, USA, Oct. 2004 (doi: 10.1109/PSCE.2004.1397701).
- [7] V. Khadkikar, A. Chandra, "A novel structure for three-phase four-wire distribution system utilizing unified power quality conditioner (UPQC)", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 45, No. 5, pp. 1897–1902, Sep./Oct.2009 (doi:10.1109/TIA.2009.2027147).
- [8] Y. Li ; D. M. Vilathgamuwa, P. C. Loh, "Microgrid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid-interfacing compensator", *IEEE Trans. on Industry Applications.*, Vol. 41, No. 6, pp. 1707–1719, Nov./Dec. 2005 (doi:10.1109/TIA.2005.858262).
- [9] T. A. Short, J. R. Stewart, D. R. Smith, J. O'Brien, K. Hampton, "Five-wire distribution system demonstration project", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 17, No. 2, pp. 649–654, April 2002 (doi:10.1109/61.997954).
- [10] M. MejboulHaque, P. Wolfs, "A four-wire reduced bus capacitance UPFC for LV distribution networks with high PV penetrations", *Proceeding of the IEEE/AUPEC*, pp. 1–7, Perth, WA, Australia , Sep./Oct. 2014 (doi:10.1109/AUPEC.2014.6966497).
- [11] D. R. R. Penido, L. R. Araujo, S. Carneiro, J. L. R. Pereira, P. A. N. Garcia, "Three-phase power flow based on four-conductor current injection method for unbalanced distribution networks", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, pp. 494–503, May 2008 (doi: 10.1109/TPWRS.2008.919423).
- [12] E. Mahdavi, R. Danaie, "Investigation of asymmetric three-phase systems with unbalanced loads", *Proceeding of the EPDC*, pp. 1-14, 1993.
- [13] A. Salarikhoo, M. RashidiNezhad, N. Khageh poor "Load flow in low-voltage distribution feeder in Kerman using backward and forward method", *Proceeding of the EPDC*, pp. 1-5, 2009.
- [14] A. Aghatehrani, "Load flow analysis with the aim of balancing and optimal load compensation and preventing voltage drop in distribution network", *Proceeding of the ICCEAS*, pp. 1-15, 2017.
- [15] Anderson PM, "Analysis of faulted power system, power system engineering series", *IEEE Press*, Piscataway, pp. 71-83, 1995.
- [16] S. Bhagavathy, N. Pearsall, G. Putrus, S. Walker, "Performance of UK distribution networks with single phase PV systems under fault", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 113, pp. 713-725, 2019 (doi:10.1016/j.ijepes.2019.05.077).
- [17] D. Ranamuka, A.P. Agalgaonkar, K.M. Muttaqi, "Conservation voltage reduction and VAR management considering urban distribution system operation with solar-PV", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 105, pp. 856-866, Feb. 2019 (doi:10.1016/j.ijepes.2018.09.027).
- [18] T. P. Abud, R. S. Maciel, B. S. M. C. Borba, "Influence of local market economic analysis on PV generation stochastic approach in LV distribution networks", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 112, pp. 178-190, Nov. 2019 (doi: /10.1016/j.ijepes.2019.04.041).