

## Voltage profile improvement through an online dynamic voltage restorer controlled by a chaos-based genetic algorithm

Mohsen Noruzi Azghandi<sup>1</sup>, · Ali Asghar Shojaei<sup>2</sup>, · Saman Toosi<sup>3</sup>

1- Ph.D. Candidate, Department of Electrical Engineering, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran, Mohsennoruzi421@yahoo.com

2- Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran, (Corresponding author) a.shojaei@iau-neyshabur.ac.ir

3- Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran, stoosi82@gmail.com

### Abstract

Factors that increase the penetration of renewable energy sources into the distributed network include the improvement in reliability indices, the increase in grid production capacity, the decrease in power loss during peak periods and fuel cost, and economic and environmental considerations on the one hand and developments in semiconductor devices on the other. When there are photovoltaic panels at the distribution network level, there are periods when the voltage exceeds its allowable area. Regarding this issue, it is necessary to find solutions to overcome this challenge. This paper suggests an online dynamic voltage restorer whose control algorithm is designed according to the genetic algorithm. Simulations were carried out according to the voltage profile of a part of Mashhad. They were investigated by DIGSILENT software. For this purpose, the real data of energy consumption in the residential sector with a time step of one hour were used, and the simulations were implemented in the form of three scenarios. The first scenario assumed no solar cell. The second assumed that the solar cell was online. The third assumed that both the cell and the dynamic voltage recovery in the line helped the system's stability and improved its power quality. According to the results, the application of the proposed control method resulted in not only a decrease of over 7% in the range of voltage variations but also an increase in the network's efficiency and reliability achieved by reducing voltage imbalance.

**Keywords:** Voltage profile, online dynamic voltage restorer, genetic algorithm, chaos theory, Mashhad electricity distribution network

Submit date: 2022/02/06

Accepted date: 2022/06/19

Corresponding author's Name: Ali Asghar Shojaei

Corresponding author address: Neyshabur, Neyshabur Branch, Islamic Azad University.

## بهبود پروفایل ولتاژ از طریق بازیاب دینامیکی ولتاژ بر خط کنترل شده توسط الگوریتم ژنتیک مبتنی بر آشوب

نوع مطالعه: پژوهشی

محسن نوروزی ازغندی<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری، علی اصغر شجاعی<sup>۱</sup>، استادیار، و سامان طوسی<sup>۱</sup>، استادیار

۱- دانشکده برق، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران

Mohsennoruzi421@yahoo.com, a.shojaei@iau-neyshabur.ac.ir, stoosi82@gmail.com

**چکیده:** عواملی چون بهبود قابلیت اطمینان، افزایش ظرفیت تولید شبکه، کاهش تلفات پیک‌سایه و هزینه سوخت و ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی از یکسو و پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌های ادوات نیمه‌هادی از سوی دیگر باعث گسترش نفوذ روز افزون منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع شده است. با حضور آرایه خورشیدی در سطح شبکه توزیع، سطح ولتاژ دچار تغییرات زیادی می‌شود به طوری که در برخی بازه‌های زمانی و همچنین برخی شرایط، از محدوده تغییرات مجاز تعیین شده نیز تخطی می‌نماید. بدین منظور لازم است که راهکارهایی برای غلبه بر این چالش اتخاذ گردد. در این مقاله استفاده از بازیاب دینامیکی ولتاژ برخط پیشنهاد شده است. ساختار کنترلی مورد استفاده از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر آشوب بهره می‌برد. استفاده از نظریه آشوب، باعث بهبود همگرایی و افزایش سرعت آن می‌گردد. به منظور اجرای شبیه‌سازی‌ها، وضعیت سطح پروفیل ولتاژ برای بخشی از شبکه توزیع مسکونی شهر مقدس مشهد توسط نرم‌افزار *DIgSILENT* مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از داده‌های واقعی مصرف انرژی در بخش مسکونی با گام زمانی یک ساعته استفاده شده و شبیه‌سازی‌ها در قالب سه سناریو پیاده‌سازی شده است. سناریوی اول زمانی است که سلول خورشیدی در مدار وجود ندارد. حالت دوم زمانی است که سلول خورشیدی در مدار است. و حالت سوم زمانی است که هم سلول و هم بازیاب دینامیکی ولتاژ در خط به پایداری سیستم و بهبود کیفیت توان آن کمک می‌کنند. برطبق نتایج بدست آمده، با اعمال روش کنترلی مذکور نه تنها بیش از ۷٪ از دامنه تغییرات ولتاژ کاسته می‌شود بلکه با کاهش سطح عدم تعادل ولتاژ، سطح بازدهی و قابلیت اعتماد شبکه نیز افزایش می‌یابد.

**کلیدواژه-** پروفایل ولتاژ، بازیاب دینامیکی برخط، الگوریتم ژنتیک، نظریه آشوب، شبکه توزیع مشهد

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸

نام نویسنده‌ی مسئول: علی اصغر شجاعی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: خراسان رضوی، نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نیشابور، دانشکده مهندسی برق

(Shojaei, Toosi, & Lotfi, 2023). طبق مطالعات صورت گرفته، متوسط انرژی تابشی افقی خورشیدی روزانه در شهر مشهد حدود  $5 \text{ Kwh/m}^2$  است. این بدان معناست که این شهر پتانسیل قابل توجهی برای نصب و راه‌اندازی سیستم برق خورشیدی دارد. مطالعات نشان می‌دهد در این شهر، راه‌اندازی نیروگاهی با ظرفیت  $1 \text{ KW}$  موجب تولید انرژی خورشیدی در حدود  $1/5$  مگاوات ساعت در سال خواهد شد (علیشاهی، مسکنی، برق و ذبیحی، پاییز ۱۳۹۲) با این حال، توان نوسانی تولید شده توسط واحدها خورشیدی باعث بروز مشکلاتی در زمینه‌هایی مانند تنظیم پروفیل ولتاژ و جریان، اغتشاشات هارمونیک، هماهنگی سیستم‌های حفاظت می‌شود. در میان چالش‌های مطرح شده در حوزه کیفیت توان، عدم تعادل و کمبود ولتاژ بسیار رایج و متداول است. عدم تعادل ولتاژ می‌تواند منجر به ایجاد اثرات منفی بر روی تجهیزات سیستم قدرت گردد (Bot et al., 2022; Lotfi, Elmi, & Saghravaniyan, 2018). در واقع تحت شرایط عدم تعادل، تلفات شبکه نیز افزایش یافته و پایداری سیستم نیز کاهش می‌یابد. همچنین این عامل می‌تواند اثرات منفی بر روی تجهیزاتی مثل موتورهای القایی، مبدل‌های الکترونیک قدرت و درایوهای تنظیم سرعت به همراه داشته باشد. طبق توصیه کمیسیون الکتروتکنیک بین‌المللی ( $IEC^1$ ) عدم تعادل مجاز ولتاژ در شبکه بایستی کمتر از  $2\%$  باشد (Pachanapan & Kanprachar, 2017). از سویی دیگر کمبود ولتاژ (کمبود بین  $60$  الی  $90$  درصد ولتاژ نامی در بازه زمانی بین  $10$  تا  $100$  میلی‌ثانیه) منجر به بروز ضررهای قابل توجهی در صنایع تولیدی حساس می‌گردد (Archana & Reji, 2015).

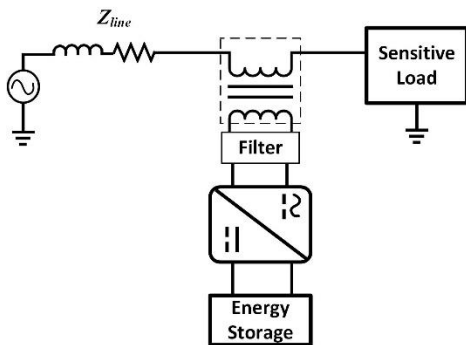
به منظور جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ، یکی از راهکارهای مرسوم استفاده از فیلترهای توان اکتیو سری و تزریق توالی منفی ولتاژ به صورت سری با خطوط شبکه توزیع می‌باشد (Amin & Elmi, 2021; Hajjiabadi, Saghravaniyan, Elmi, Samadi, & Networks, 2019). در مرجع (Hojo, Iwase, Funabashi, & Ueda, 2008) روشی برای جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ از طریق تزریق جریان توالی منفی توسط  $DG$  معرفی شده است. با استفاده از این تکنیک، جریان‌های خطوط متعادل می‌گردند در حالی که بار همچنان نامتعادل است. رویکرد معرفی شده در مرجع (Cheng, Chen, Lee, & Kuo, 2009) براساس کنترل  $DG$  به عنوان یک رسانای توالی منفی در جهت جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ در ترمینال‌های  $DG$  است. توجه شود که در این مرجع مطالعات بر روی یک ریزشبکه صورت گرفته است. در

جدول ۱: علائم و اختصارات

معنای فارسی	عبارت کامل	علائم اختصاری
تولید پراکنده	Distributed Generation	DG
کمیسیون الکتروتکنیک بین‌المللی	International Electro-technique commission	IEC
بازیاب دینامیکی ولتاژ	Dynamic Voltage Restorer	DVR
بازیاب دینامیکی ولتاژ بین خط	Inline Dynamic Voltage Restorer	IDVR
ضریب عدم تعادل ولتاژ	Voltage Unbalance Factor	VUF
کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرالی	Proportional-Integrator Controller	PI
جبران‌سازی عدم تعادل	Unbalance compensation reference	UCR
مدولاتور عرض پالس	Pulse width modulator	PWM
سیکل وظیفه	Duty cycle	D
مقاومت فیلتر	Filter resistance	$r_L$
مقدار متوسط ولتاژ توالی منفی	Mean value of negative sequence of voltage	$\bar{V}_\alpha^-$
مقدار متوسط ولتاژ توالی مثبت	Mean value of positive sequence of voltage	$\bar{V}_\alpha^+$
ولتاژ بازیاب دینامیکی	DVR voltage	$V_{DVR}$
ولتاژ بار	Load Voltage	$V_{Load}$
امپدانس خط	Line impedance	$Z_{line}$
جریان خط	Line current	$I_{line}$
ولتاژ شبکه	Grid voltage	$V_s$

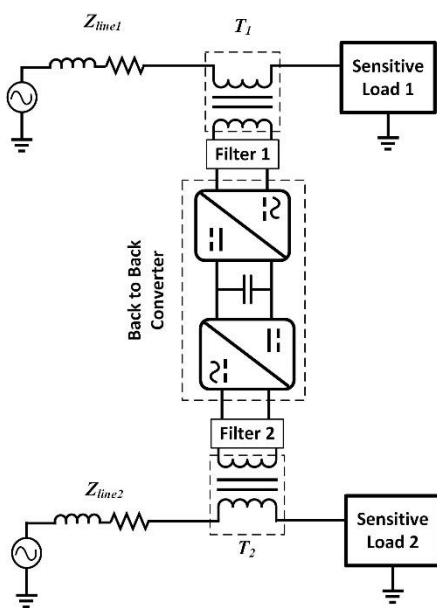
#### ۱- مقدمه

افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و پدیده گرمایش جهانی به‌همراه رشد صنعت در زمینه‌ی تجهیزات الکترونیک قدرت در کنار طرح‌های تشویقی در نظر گرفته شده توسط دولت، سبب شده است که نفوذ واحدها تجدیدپذیر خصوصاً باد و خورشید به شبکه افزایش چشمگیری یابد. (Lotfi, 2022; Lotfi & Ghazi, 2021; Noruzi Azghandi, 2021)



شکل ۱: بازیاب دینامیکی ولتاژ برخط

در ساختار IDVR، زمانیکه دو فیدر در مجاورت هم قرار دارند، دو بازیاب به صورت پشت به پشت از طریق یک لینک DC مشترک با یکدیگر کوپل می‌گردند. در صورتی که فیدرها در شرایط نرمال باشند، اینورترهای آنها از مدار خارج خواهند شد. تنها مقاومت سری سیم‌پیچ‌ها در مدار خواهد بود. در صورتی که در یکی از فیدرها کمبود ولتاژ رخ دهد، با در نظر گرفتن ضریب بارگیری خطوط، میزان کسری توان مورد نیاز تامین می‌گردد. روش کار بدین صورت است که توان از باس DC برداشته شده و به نحوی به خطی که دچار کمبود ولتاژ است منتقل می‌گردد، که بار متوجه کمبود ولتاژ نشود. با انتقال توان از باس DC ولتاژ خازن افت می‌کند. در ادامه از خطی که در شرایط نرمال قرار دارد چنان توانی به باس DC منتقل می‌شود که هم ولتاژ باس DC تنظیم شود و هم افت بارهای تغذیه شده توسط این خط با کمبودی روبرو نشوند. این روش در مراجع مختلف برای جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ و همچنین کمبود آن به خوبی کارایی دارد (شکل ۲).



شکل ۲: ساختار IDVR

روش کنترلی این مرجع که در قاب سنکرون پیاده‌سازی شده است، جبران‌سازی براساس تعیین مقدار مرجعی برای رسانایی توالی منفی صورت می‌گیرد. مقدار این پارامتر بر اساس توان راکتیو انتقالی در توالی منفی تعیین می‌شود. به بیان بهتر از مقدار رسانایی به منظور تولید جریان مرجع جبران‌سازی استفاده خواهد شد. با این وجود در روش‌های بیان شده، تحت شرایط عدم تعادل شدید، مقدار قابل توجهی از ظرفیت‌های مبدل‌های واسط جهت جبران‌سازی مورد نیاز است که می‌تواند باعث ایجاد تداخل در تامین توان از طریق DG گردد. در این مقاله از بازیاب دینامیکی ولتاژ برخط (IDVR<sup>1</sup>) استفاده شده که با کمک رویکرد کنترلی پیشنهاد شده، می‌تواند با جبران‌سازی ولتاژ شبکه، نه تنها شاخص‌های کیفیت توان شبکه را بهبود بخشد بلکه مقدار تلفات توان را نیز کاهش دهد. در این راستا مهم‌ترین دستاوردهای مقاله به قرار زیر می‌باشد:

- مدل‌سازی عملکرد بازیاب دینامیکی ولتاژ برخط به منظور کنترل سطح ولتاژ در قسمتی از یک شبکه توزیع
- ارزیابی سیستم کنترلی با در نظر گرفتن یکپارچه شدن پنل‌های خورشیدی پشت‌بامی
- پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی در قالب سه سناریو متفاوت بر روی قسمتی از شبکه توزیع شهرستان مشهد و بهره‌گیری از داده‌های آماری واقعی

ادامه‌ی مقاله به صورت زیر بخش‌بندی شده است.

در قسمت دوم ساختار، نحوه عملکرد و مشخصات بازیاب دینامیکی ولتاژ برخط بیان شده است. در بخش سوم، تابع هدف مدل‌سازی و تعدادی از قیود حاکم بر مساله بیان و مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک مبتنی بر آشوب ارائه شده است. در بخش چهارم مشخصات شبکه تحت مطالعه به همراه جزئیات الگوی تابش منطقه بیان گردیده است. در همین قسمت نتایج شبیه‌سازی در قالب سه سناریو تبیین و با یکدیگر مقایسه شده است. در قسمت آخر نیز نتیجه‌گیری بدست آمده از رویکرد پیشنهادی بیان شده است.

## ۲- بازیاب دینامیکی ولتاژ برخط

شکل (۱) شماتیک تک‌خطی نحوه اتصال IDVR به سیستم انتقال را نشان می‌دهد که در حال تغذیه‌ی یک بار حساس به تغییرات ولتاژ می‌باشد.

از دیگر روش‌های کنترلی است. در این روش ولتاژ نقطه‌ی اتصال IDVR و بار اندازه‌گیری می‌شود. در ادامه توالی مثبت و منفی آنها جدا می‌گردد. پس از آن به وسیله‌ی دو کنترل‌کننده‌ی تناسب-انگرالی که یکی برای توالی مثبت و یکی برای توالی منفی در نظر گرفته شده است ولتاژ توالی مثبت و منفی IDVR مشخص می‌شود. در نهایت هم توسط مدولاتور عرض پالس (PWM) این ولتاژ در خروجی اینورتر تولید و توسط ترانس به صورت سری بین شبکه و بار قرار می‌گیرد (Ciobotaru, Teodorescu, & Blaabjerg, 2006; Eltamaly, Mohamed, El-Sayed, & Abd Elghaffar, 2018).

### ۳- بیان تابع هدف

در مرحله اول از ساختار پیشنهادی، ولتاژ و جریان خروجی سه‌فاز در سمت بار اندازه‌گیری شده و به قاب مرجع  $\alpha\beta$  منتقل می‌شود. به وسیله‌ی این تبدیل و با استفاده از یک فیلتر به راحتی می‌توان توالی‌های مثبت و منفی ولتاژ خروجی و توالی مثبت و منفی جریان خروجی را استخراج کرد. مؤلفه‌های  $\alpha$  توالی‌های مثبت و منفی ولتاژ خروجی به بلوک تنظیم‌کننده ضریب عدم تعادل ولتاژ (VUF) وارد می‌شود. در ادامه مقادیر متوسط شکل موج‌های یکسوسده با اعمال دو تابع قدر مطلق و فیلترهای پایین‌گذر (LPF) محاسبه می‌شوند. بر طبق تئوری‌های مؤلفه‌های متقارن بیان شده در (Glover & Sarma, 1993)، یک سیستم الکتریکی نامتعادل توسط دو سیستم متعادل توالی مثبت و منفی مجزا از یکدیگر قابل ارزیابی است (در صورت نبودن توالی صفر). بنابراین می‌توان از دی‌گرام تک‌فاز اینورتر IDVR جهت مدل‌سازی سیستم کنترل توالی مثبت (یا منفی) بهره گرفت. در این حالت، دینامیک‌های ولتاژ خروجی به صورت رابطه (۱)، قابل استخراج است.

$$V_{DVR} = \frac{V_{dc}}{LCs^2 + r_L Cs + 1} d - \frac{Ls + r_L}{LCs^2 + r_L Cs + 1} i \quad (1)$$

بدین ترتیب VUF در نقطه تزویج مشترک، طبق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

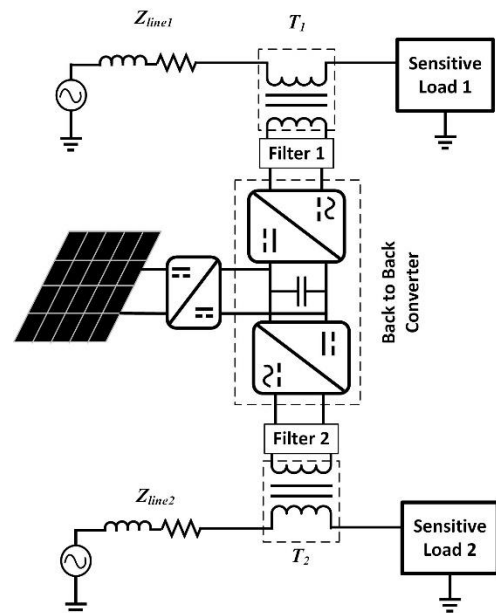
$$VUF = \frac{\bar{V}_\alpha^-}{\bar{V}_\alpha^+} 100 = \frac{abs(\bar{V}_\alpha^-).LPF}{abs(\bar{V}_\alpha^+).LPF} 100 \quad (2)$$

$$= \frac{abs(\bar{V}_\alpha^-).LPF}{230\sqrt{3}\frac{2}{\pi}} 100 \quad (3)$$

با فرض کردن روابط (۳) و (۴)، رابطه (۵) قابل دستیابی است.

حال اگر یک منبع تجدید پذیر به باس DC متصل شود الگوریتم کنترلی به طور کامل متفاوت خواهد بود. این حالتی است که تاکنون به طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته است (Rauf & Khadkikar, 2014).

بازه زمانی عملکرد IDVR دقیقاً بعد از وقوع خطا است یعنی دقیقاً زمانی که ولتاژ افت می‌کند. به عبارت دیگر قبل از اینکه سیستم حفاظتی عمل نماید، IDVR باید وارد عمل شده و با انتقال توان به خطی که با افت ولتاژ مواجه شده است، کیفیت توان را بهبود دهد. این توان می‌تواند از طریق سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، واحدهای تجدیدپذیر یا تولید پراکنده، و یا خط مجاور تامین شود. در این شرایط تنظیمات سیستم‌های حفاظتی طوری صورت می‌گیرد که بعد از عملکرد IDVR و در صورت نیاز عمل نمایند. برای اینکه بتوان هم کمبود ولتاژ و هم عدم تعادل را جبران نمود، می‌توان علاوه بر منابع انرژی تجدیدپذیر و منابع ذخیره‌ساز انرژی، از بانک‌های خازنی و راکتورهای سلفی نیز بهره گرفت تا بتوان همزمان مقدار توان اکتیو و توان راکتیو کسری در شبکه را به طورت مستقل جبران نمود. سیستم‌های حفاظتی باید در صورت خطا در سیستم وارد عمل شده و خیلی سریع خطا را برطرف کنند تا تجهیزات آسیبی نبینند. از طرفی IDVR باید دقیقاً بعد از خطا و قبل از سیستم حفاظتی عمل کند تا در صورت امکان مانع از عملکرد سیستم حفاظتی شود. از اینرو یکی از چالش‌های اصلی در این زمینه، انتخاب یک سیستم کنترلی مناسب با قدرت درک بالا و زمان پاسخگویی کوتاه است.



شکل ۳: ساختار IDVR به همراه واحد خورشیدی

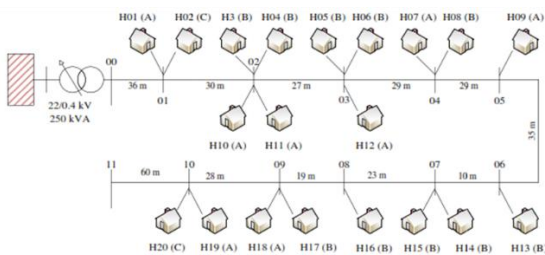
بدین منظور تابحال روش‌های متعددی از جمله رویکرد کنترلی (S.-J. Lee, Kim, & Sul, 2004) رویکرد آبخاری فیدبک جریان و ولتاژ (S.-Y. Lee et al., 1998) و ... معرفی شده است. تفکیک توالی‌های مثبت و منفی و در ادامه تنظیم مقدار آنها به ترتیب بر روی و صفر نیز

EN50160، محدوده قابل پذیرش برای شرایط عدم تعادل در شبکه‌های فشار ضعیف کمتر از ۲٪ از بیشتر از ۹۵٪ از بازه‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای در طول یک هفته است (Chen, Yang, Yang, & Systems, 2013). مشارکت دادن نگاشت‌های آشوب‌ناک در ساختار اصلی الگوریتم‌های ابتکاری به این منظور صورت می‌پذیرد که روند تولید اعداد تصادفی برای ایجاد جمعیت بهبود یابد و با استفاده از قواعد حرکت آشوب‌گونه، احتمال دستیابی به نقطه بهینه سراسری بهبود یابد زیرا در این شرایط هر حالت فقط یک بار تکرار می‌شود و با خارج شدن از نقاط بهینه محلی، بهبود روند همگرایی را به ارمغان می‌آورد.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

در شکل (۵) یک تصویر هوایی از قسمتی از شبکه سنتی شعاعی شهر مشهد، نشان داده شده که توسط نرم‌افزار GIS بدست آمده است. در این شکل قطعات واحدهای مسکونی، جانمایی مسیر شبکه توزیع، تعداد انشعابات مشخص گردیده است. در این مقاله از میزان تابش پرتوهای خورشیدی در شهرستان مشهد در سال ۱۳۹۹ به عنوان ورودی استفاده شده است. به منظور نمونه، میزان متوسط ساعات آفتابی برای شهر مشهد در شکل (۶) نشان داده شده است (Shukla, Kapoor, & Garg, 2019).

شبکه توزیع مسکونی تحت مطالعه به صورت سه فاز چهارسیمه بوده و بارهای خانگی تک‌فاز را تغذیه می‌نماید. در این شرایط عدم برابری میان بارهای مصرفی خانگی با میزان توان عرضه شده در بازه‌های زمانی مختلف، باعث ایجاد عدم تعادل در سطح ولتاژ شبکه توزیع می‌گردد. با افزایش درصد نفوذ آرایه‌های خورشیدی، شاخص عدم تعادل ولتاژ در باس‌های انتهایی که در فاصله بیشتری از فیدر توزیع قرار گرفته‌اند، کاهش چشمگیری را نشان می‌دهد. در ادامه نتایج بدست آمده در قالب سناریو بیان شده است.



شکل ۵: شماتیک شبکه توزیع شعاعی تحت مطالعه

$$VUF^* = 0.5\% \quad (۳)$$

$$abs(\bar{V}_\alpha^-) = \pm \bar{V}_\alpha^- \quad (۴)$$

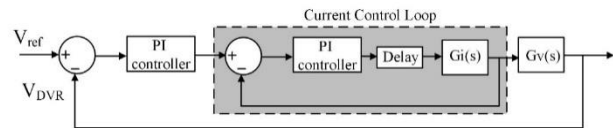
$$UCR_\alpha = [0.5V_\alpha^- \pm 0.39(V_\alpha^-)^2.LPF].PI \quad (۵)$$

ولتاژ خروجی DVR نیز از طریق رابطه‌ی (۶) مشخص می‌گردد.

$$UCR_\alpha = [0.5V_\alpha^- \pm 0.39(V_\alpha^-)^2.LPF].PI \quad (۵)$$

$$V_{DVR} = V_{Load} + Z_{line}I_{line} - V_s \quad (۶)$$

در شکل (۴) مدار معادل کنترل‌کننده نمایش داده شده است. در این مقاله هدف این است که با مدیریت کنترل‌کننده IDVR، هم مقدار افت ولتاژ در فیدرهای شبکه توزیع حداقل گردد و هم کمترین میزان عدم تعادل در بین فازهای شبکه مشاهده گردد. لذا تابع هدف به صورت رابطه (۷) تعریف می‌گردد.



شکل ۴: بلوک دیاگرام سیستم کنترلی

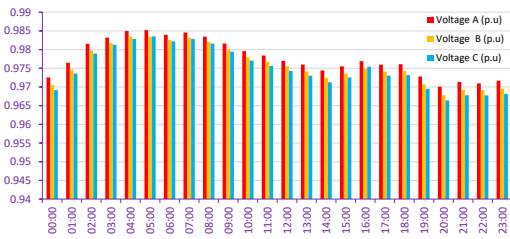
$$\min J = \Delta V_{.p.u} + \Delta U_{.p.u} \quad (۷)$$

عبارت اول در سمت راست ( $\Delta V_{.p.u}$ )، بیان‌گر مقدار تغییرات ولتاژ در فیدرهای شبکه توزیع و عبارت دوم ( $\Delta U_{.p.u}$ ) مبین مقدار عدم تعادل ولتاژ سه‌فاز در فیدرهای شبکه است. لازم به ذکر است که هر دو عبارت به صورت پریونیت شده در رابطه (۷) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای اندازه‌گیری میزان عدم تعادل، از تعریف نرخ عدم تعادل ولتاژ ارایه شده توسط سازمان ملی انرژی ایالات متحده استفاده شده است (Savaghebi, Jalilian, Vasquez, & Guerrero, 2012) (رابطه ۸).

$$\Delta U = \frac{\max \{ \Delta |V_i^{AB}|, \Delta |V_i^{AC}|, \Delta |V_i^{BC}| \}}{|V_i^{ave}|} \quad (۸)$$

$$V_i^{ave} = \frac{|V_i^{AB} + V_i^{AC} + V_i^{BC}|}{3} \quad (۹)$$

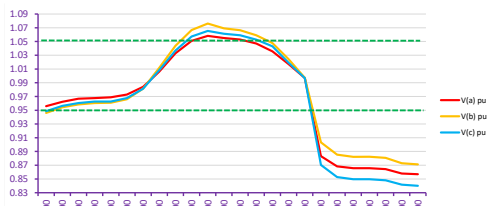
در این رابطه  $\Delta |V_i^{AB}|$  انحراف دامنه‌ی ولتاژ خط AB از مقدار نامی آن برای باس نام و  $V_i^{ave}$  متوسط دامنه‌ی ولتاژ سه فاز برای باس نام است. در واقع هرچقدر میزان عدم تعادل ایجاد شده در بین ولتاژها کمتر باشد، مقدار این شاخص هم کاهش می‌یابد. بر طبق استاندارد اروپایی



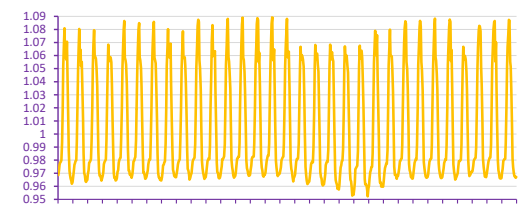
شکل ۹: تغییرات دامنه ولتاژ در باس ۱۰ (بدون نفوذ آرایه‌های خورشیدی)

#### ۲-۴ سناریو ۲: بکارگیری پنل‌های خورشیدی

در این سناریو فرض شده است که ۵۰٪ از مشترکین مجهز به آرایه‌های خورشیدی به ظرفیت 5kW می‌باشند. در این شرایط عدم تعادل ولتاژ قابل ملاحظه‌ای در باس‌های انتهایی فیدر مشاهده می‌گردد. به طور نمونه، نتایج بدست آمده برای باس ۹ در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در این شرایط دامنه هر سه فاز شبکه از مقادیر مجاز تعیین شده تخطی می‌نماید. مقدار تغییرات دامنه ولتاژ فاز A برای باس ۱۰ نیز در این شرایط در شکل (۱۱) به نمایش درآمده است.



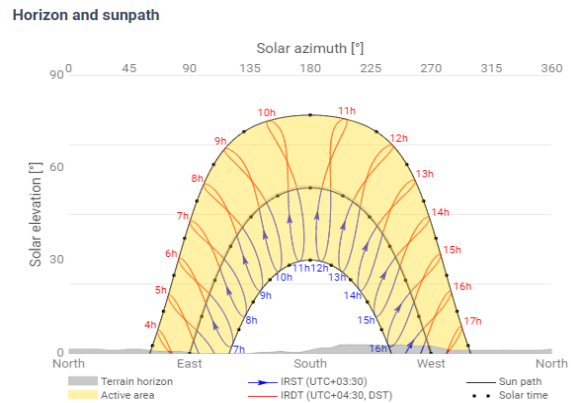
شکل ۱۰: عدم تعادل ولتاژ در باس ۹ (درصد نفوذ ۵۰٪ آرایه‌های خورشیدی)



شکل ۱۱: تغییرات دامنه ولتاژ فاز A در باس ۱۰ (درصد نفوذ ۵۰٪ آرایه‌های خورشیدی)

#### ۳-۴ سناریو ۳: بکارگیری پنل‌های خورشیدی + IDVR

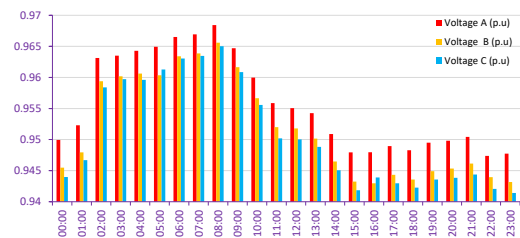
در این سناریو فرض شده است که میزان درصد نفوذ پنل‌های خورشیدی برابر ۵۰٪ باشد، ولی از بازیاب دینامیکی ولتاژ برخط (IDVR) نیز برای کنترل پروفایل ولتاژ بهره گرفته شده است. نتایج استفاده از IDVR در کاهش میزان تغییرات دامنه ولتاژ فاز A باس ۹ و میزان عدم تعادل ولتاژ سه فاز باس ۱۰ به ترتیب در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. بر اساس شکل‌های بدست آمده، مشخص می‌گردد که تمام



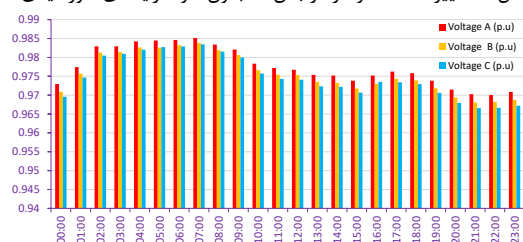
شکل ۶: متوسط ساعات آفتابی در مشهد (Shukla et al., 2019)

#### ۱-۴ سناریو ۱: عدم بکارگیری پنل‌های خورشیدی

در این سناریو فرض شده است که هیچ مصرف‌کننده‌ای از پنل‌های خورشیدی استفاده نمی‌نماید. تغییرات دامنه ولتاژ برای باس‌های ۸، ۹ و ۱۰ به ترتیب در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها مشخص است، در این شرایط هیچ‌گونه تخطی از مقدار آستانه تعیین شده برای ولتاژ فازها (1.05 P.U.) صورت نمی‌پذیرد.



شکل ۷: تغییرات دامنه ولتاژ در باس ۸ (بدون نفوذ آرایه‌های خورشیدی)



شکل ۸: تغییرات دامنه ولتاژ در باس ۹ (بدون نفوذ آرایه‌های خورشیدی)

			استفاده از IDVR (باس ۹)
۱.۰۳۸	۱.۰۴۱	۱.۰۴۴	ضریب نفوذ ۵۰ درصدی PV - استفاده از IDVR (باس ۸)

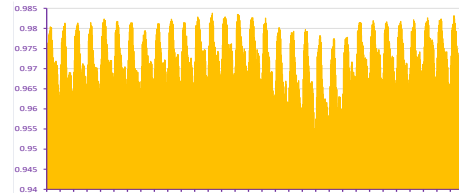
### ۵- نتیجه‌گیری

یکپارچگی منابع تولید پراکنده با شبکه سراسری می‌تواند باعث گسترش منابع تولیدکننده انرژی، بهبود بازدهی، راحتی نصب و بهره‌برداری، ارتقای امنیت، افزایش کیفیت توان و قابلیت اطمینان و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی گردد. اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه توزیع باعث ایجاد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در بهره‌برداری از شبکه و بروز اثرات متعددی بر روی کیفیت توان آن می‌گردد. اکثر مطالعات صورت گرفته در زمینه اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه سراسری، تنها تبادل توان اکتیو را مدنظر قرار داده‌اند. با این وجود، چالش‌هایی از جمله کاهش دامنه ولتاژ در ساعات کمبود انرژی خورشیدی و عدم تعادل بار ایجاد شده در اثر افزایش درصد نفوذ آنها در شبکه نیز بایستی مورد مطالعه قرار گیرد. در این مقاله از بازیاب دینامیکی ولتاژ برخط (IDVR) برای غلبه بر چالش‌های ذکر شده استفاده شده است. از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر آشوب نیز برای هدایت سیستم کنترل کننده تناسبی - انتگرالی IDVR بهره گرفته شده که دارای سرعت همگرایی مناسبی است. برای پیاده‌سازی شبیه‌سازی‌ها از دو نرم‌افزار DIgSILENT Power Factory و MATLAB بهره گرفته شده و نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که با اعمال روش کنترلی مذکور نه تنها بیش از ۷٪ از دامنه تغییرات ولتاژ کاسته می‌شود بلکه با کاهش سطح عدم تعادل ولتاژ، سطح بازدهی و قابلیت اعتماد شبکه نیز افزایش می‌یابد

مراجع

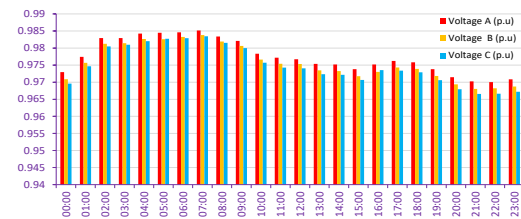
- Amin, F., & Elmi, M. M. B. (2021). *Security Assessment and Reliability Improvement with considering Demand Response*. Paper presented at the 2021 25th Electrical Power Distribution Conference (EPDC).
- Archana, T., & Reji, P. (2015). *Power quality improvement using self-supported Dynamic Voltage Restorer (DVR) in distribution system*. Paper presented at the 2015 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC).
- Bot, Y., Naama, B., Yousfi, A., Allali, A., Denai, M. J. J. o. R & „Energy, S. (2022). Control of line

کاهش ولتاژهای ایجاد شده بر روی باس‌ها در تمام زمان‌ها در محدوده مجاز قرار می‌گیرد. با استفاده از چنین رویکردی، نه تنها هیچ دامنه ولتاژی از مقدار کران پایین خود تخطی نمی‌نماید بلکه در تمام حالات، ضرائب عدم تعادل ولتاژ کاهش یافته و در محدوده استاندارد تعریف شده قرار می‌گیرد.



شکل ۱۲: تغییرات دامنه ولتاژ فاز A با استفاده از IDVR (درصد نفوذ ۵۰٪ آرایه‌های

خورشیدی)



شکل ۱۳: تغییرات دامنه ولتاژ در باس ۱۰ با استفاده از IDVR (درصد نفوذ ۵۰٪

آرایه‌های خورشیدی)

در ادامه نتایج عددی بدست آمده از طریق استفاده از IDVR ارائه شده است. همانطور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود با استفاده از IDVR در ضریب نفوذ ۵۰٪، بیش از ۷٪ از مقدار دامنه ولتاژ کاسته می‌شود.

جدول ۱: میانگین دامنه ولتاژ باس‌های شبکه در درصد نفوذ ۵۰٪ (P.U.)

وضعیت شبکه	فاز ۱	فاز ۲	فاز ۳
بدون حضور PV (باس ۸)	۰.۹۸۷	۰.۹۸۲	۰.۹۸۰
بدون حضور PV (باس ۹)	۰.۹۸۳	۰.۹۸۰	۰.۹۷۸
بدون حضور PV (باس ۱۰)	۰.۹۷۷	۰.۹۷۴	۰.۹۷۲
ضریب نفوذ ۵۰ درصدی PV - بدون استفاده از IDVR (باس ۸)	۱.۰۶۴	۱.۰۶۲	۱.۰۵۶
ضریب نفوذ ۵۰ درصدی PV - بدون استفاده از IDVR (باس ۹)	۱.۰۷۶	۱.۰۷۵	۱.۰۷۱
ضریب نفوذ ۵۰ درصدی PV - بدون استفاده از IDVR (باس ۱۰)	۱.۰۸۷	۱.۰۸۴	۱.۰۸۱
ضریب نفوذ ۵۰ درصدی PV - استفاده از IDVR (باس ۸)	۱.۰۳۲	۱.۰۳۰	۱.۰۲۸
ضریب نفوذ ۵۰ درصدی PV - استفاده از IDVR (باس ۹)	۱.۰۳۶	۱.۰۳۵	۱.۰۳۳

- and DG in distribution networks using particle swarm optimization algorithm. 7(01), 35-41 .
- Lotfi ,H., & Ghazi, R. (2021). Optimal participation of demand response aggregators in reconfigurable distribution system considering photovoltaic and storage units. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(2), 2233-2255 .
- Noruzi Azghandi, M .,Shojaei, A. A., Toosi, S., & Lotfi, H. (2023). Optimal reconfiguration of distribution network feeders considering electrical vehicles and distributed generators. *Evolutionary Intelligence*, 16,49-66.
- Pachanapan, P., & Kanprachar, S. J. G. I. J. (2017). Voltage level management of low voltage radial distribution networks with high penetration of rooftop PV systems. 11(1), 16-22 .
- Rauf, A. M., & Khadkikar, V. J. I. t. o. i. e. (2014). An enhanced voltage sag compensation scheme for dynamic voltage restorer 5(62) ,2683-2692.
- Savaghebi, M., Jalilian, A., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. J. I. t. o. S. G. (2012). Secondary control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid. 3(2), 797-807 .
- Shukla, A., Kapoor, M., & Garg, R. (2019). *Geospatial analysis and prediction of Solar Energy at Rural area using Helosat-4, Global Solar Atlas, NASA POWER, SMARTS, and measured data in Hadoop*. Paper presented at the AGU Fall Meeting Abstracts.
- علی‌شاهی, س., مسکنی, ح., برق, س., و ذبیحی, م. (پاییز ۱۳۹۲). اصول طراحی سیستم های فتوولتائیک: شرکت توزیع نیروی برق مشهد.
- voltage unbalance factor in three-phase distribution grids caused by single-phase photovoltaic systems. 14(2), 026301 .
- Chen, T.-H., Yang, C.-H., Yang, N.-C. J. I. J. o. E. P., & Systems, E. (2013). Examination of the definitions of voltage unbalance. 49, 380-385 .
- Cheng, P.-T., Chen, C.-A., Lee, T.-L., & Kuo, S.-Y. J. I. T. o. I. A. (2009). A cooperative imbalance compensation method for distributed-generation interface converters. 45(2), 805-815 .
- Ciobotaru, M., Teodorescu, R., & Blaabjerg, F. (2006). *A new single-phase PLL structure based on second order generalized integrator*. Paper presented at the 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference.
- Eltamaly, A. M., Mohamed, Y. S., El-Sayed, A.-H. M., & Abd Elghaffar, A. N. (2018). *Enhancement of power system quality using PI control technique with DVR for mitigation voltage sag*. Paper presented at the 2018 twentieth international middle east power systems conference (MEPCON).
- Glover, J. D., & Sarma, M. (1993). *Power system analysis & design* (2 ed.). Boston: Cengage Learning.
- Hajiabadi, M. E., Saghravaniyan, S., Elmi, M. M. B., Samadi, M. J. S. E., Grids, & Networks. (2019). Determination of consumer satisfaction level in double-sided power market: An analytical decomposition approach. 17, 100193 .
- Hojo, M., Iwase, Y., Funabashi, T., & Ueda, Y. (2008). *A method of three-phase balancing in microgrid by photovoltaic generation systems*. Paper presented at the 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference.
- Lee, S.-J., Kim, H., & Sul, S.-K. (2004). *A novel control method for the compensation voltages in dynamic voltage restorers*. Paper presented at the Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC. ۴'
- Lee, S.-Y., Chae, Y.-M., Cho, J.-S., Choe, G.-H., Mok, H.-S., & Jang, D.-H. (1998). *A new control strategy for instantaneous voltage compensator using 3-phase PWM inverter*. Paper presented at the PESC 98 Record. 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (Cat. No. 98CH36196).
- Lotfi, H. (2022). Optimal sizing of distributed generation units and shunt capacitors in the distribution system considering uncertainty resources by the modified evolutionary algorithm. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 13(10), 4739-4758 .
- Lotfi, H., Elmi, M. B., & Saghravaniyan, S. J. I. J. o. S. E. E. (2018). Simultaneous placement of capacitor