

Kristián Eliáš, Rafał Kurdyla, Július Šimčák, Ľubomír Beňa

Analýza vplyvu jednofázových fotovoltických elektrární na veľkosť a nesymetriu napätia v mieste pripojenia

Čoraz viac koncových užívateľov elektriny v súčasnosti inštaluje vo svojich odberných miestach fotovoltické elektrárne. Náklady na zriadenie fotovoltickej elektrárne sa v poslednej dekáde významne znížili, technológia zaznamenala výrazný pokrok, a preto sa fotovoltické elektrárne stávajú účinným nástrojom na zníženie závislosti od konvenčného spôsobu napájania. Prevádzka fotovoltických elektrární sa však vyznačuje spätnými vplyvmi na kvalitu elektrickej energie v distribučnej sústave, v ktorej sú inštalované. Táto štúdia sa zameriava na analýzu spätných vplyvov jednofázových fotovoltických elektrární na vybrané kvalitatívne ukazovatele elektrickej energie, konkrétne veľkosť a nesymetriu napätia. Analýza vychádza z údajov nameraných v reálnej distribučnej sieti nízkeho napätia.

Kľúčové slová: distribučná sústava, kvalita elektrickej energie, napäťová nesymetria, fotovoltické elektrárne

Increasingly more end-users of electricity are currently installing photovoltaic power plants at their consumption points. The costs of establishing photovoltaic power plants have significantly decreased in the last decade, the technology has made significant progress, and therefore photovoltaic power plants are becoming an effective tool to reduce dependence on conventional power supply methods. However, the operation of photovoltaic power plants is characterized by feedback effects on the power quality in the distribution system in which they are installed. This study focuses on the analysis of the feedback effects of single-phase photovoltaic power plants on selected qualitative indicators of electricity, specifically voltage magnitude and unbalance. The analysis is based on data measured in a real low-voltage distribution network. **(Analysis of the impact of single-phase photovoltaic power plants on voltage magnitude and unbalance at the point of connection)**

Keywords: distribution system, power quality, voltage unbalance, photovoltaic power plants

I. ÚVOD

Elektrická energia je produkt, na ktorý sú kladené určité požiadavky v oblasti kvality [1]. Kvalitou elektrickej energie sa zaoberá norma EN 50160, v ktorej sú definované, opísané a špecifikované hlavné charakteristiky napätia na napájacích svorkách užívateľov vo verejných elektrických sieťach pri normálnych prevádzkových podmienkach [2]. Za úroveň kvality elektrickej energie v distribučnej sieti nízkeho napätia zodpovedá jej prevádzkovateľ [3]. V prípade, že kvalita elektrickej energie nebude mať požadovanú úroveň, môže dôjsť k ohrozeniu spoľahlivosti a bezpečnosti prevádzky elektrických zariadení pripojených k sieti.

Podľa normy EN 50160:2022 by odchýlky napájacieho napätia v nízkonapäťovej distribučnej sieti nemali presiahnuť ± 10 % menovitého napätia siete U_n , ktoré má pri štvorvodičových trojfázových sieťach hodnotu 230 V (medzi fázou a neutrálnym vodičom) [2]. Veľkosť napätia na napájacích svorkách užívateľa by sa teda mala pohybovať v rozmedzí od 207 V do 253 V.

Veľkosť napätia jednotlivých fáz voči neutrálnemu vodiču sa však v odbernom mieste môže líšiť, čím dochádza k vzniku napäťovej nesymetrie. Tá je definovaná ako stav, keď vektory napätí v jednotlivých fázach nemajú rovnakú veľkosť alebo nemajú rovnaký vzájomný fázový posun (t. j. 120°), prípadne oboje [4]. V distribučných sieťach nízkeho napätia je nesymetria bežne sa vyskytujúcim javom. Príčinou nesymetrie je najmä nerovnomerné zaťaženie jednotlivých fáz trojfázovej siete alebo nesymetria trojfázových impedancií distribučných vedení a transformátorov [5].

Na výpočet nesymetrie napätia je možné použiť niekoľko výpočtových metód. K najčastejšie používaným patrí metóda podľa IEEE, pri ktorej je nesymetriu napätia možné vypočítať iba na základe

veľkostí fázových napätí. Podľa IEEE je napäťová nesymetria daná pomerom maximálnej odchýlky fázových napätí od priemernej hodnoty fázových napätí a priemernej hodnoty fázových napätí [6][7]. Vzťah pre výpočet nesymetrie napätia podľa IEEE je nasledovný [8]:

$$VU (\%) = \frac{\max(|\Delta U_{L1}|; |\Delta U_{L2}|; |\Delta U_{L3}|)}{\bar{U}_f} \cdot 100 \quad (1)$$

kde:

VU je napäťová nesymetria vypočítaná podľa IEEE,

$\bar{U}_f$ je priemerná hodnota fázových napätí a vypočíta sa podľa vzťahu:

$$\bar{U}_f = \frac{U_{L1} + U_{L2} + U_{L3}}{3} \quad (2)$$

ΔU_{L1} je odchýlka fázového napätia vo fáze L1 od priemernej hodnoty fázových napätí a vypočíta sa podľa vzťahu:

$$\Delta U_{L1} = U_{L1} - \bar{U}_f \quad (3)$$

Vzťah (3) je platný analogicky aj pre výpočet odchýlok v ďalších dvoch fázach.

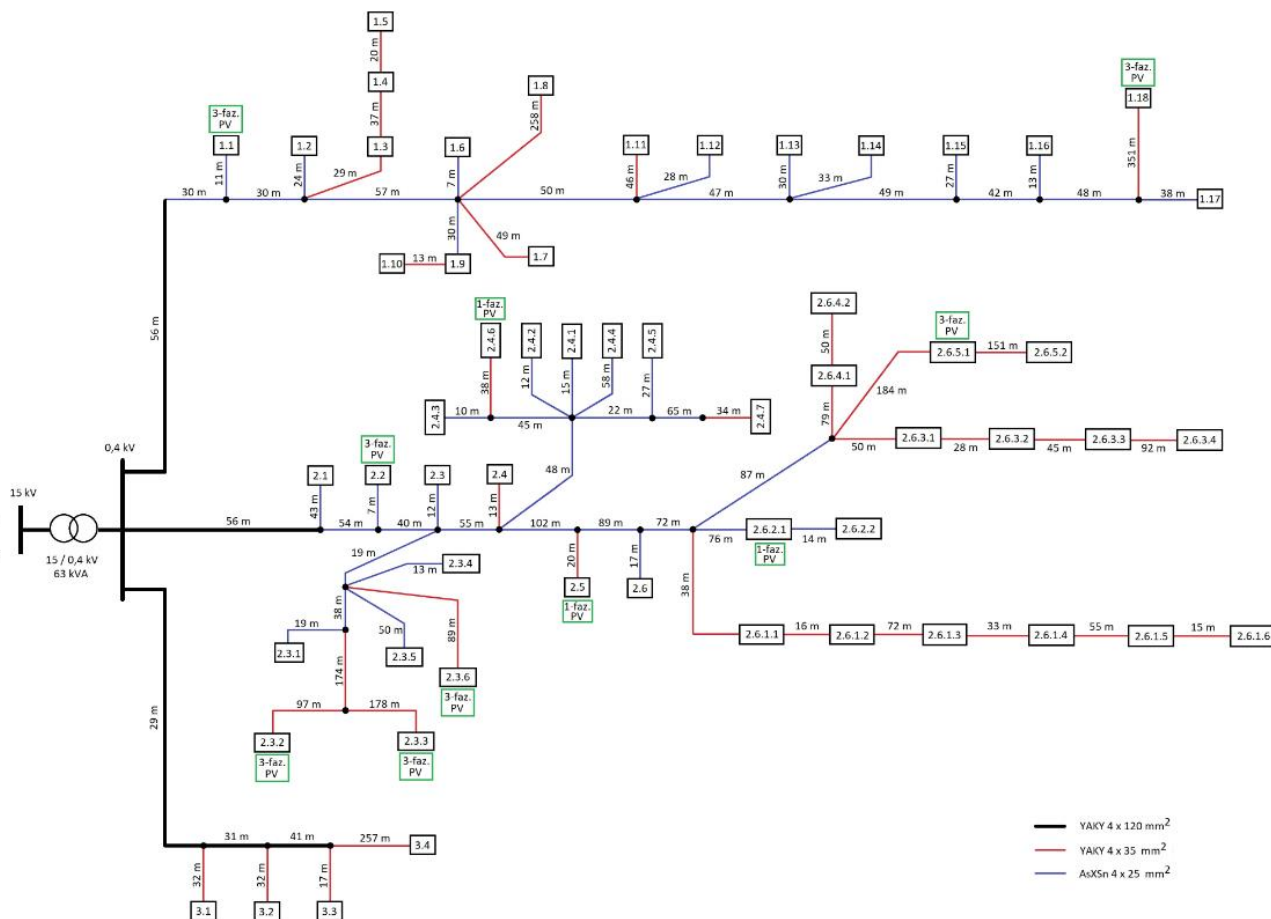
Na nesymetriu napätia sú citlivé najmä trojfázové rotačné stroje, pri ktorých nesymetria napájacieho napätia spôsobuje prehrievanie rotorových a statorových vinutí [9]. Aby nedochádzalo k negatívnemu vplyvu na činnosť elektrických zariadení v dôsledku nesymetrie napájacieho napätia, tak norma IEEE 141-1993 odporúča, aby hodnota napäťovej nesymetrie bola menej ako 2 % [10][11].

II. ANALÝZA VPLYVU FOTOVOLTICKÝCH ELEKTRÁRNÍ NA DISTRIBUČNÚ SÚSTAVU NÍZKEHO NAPÄTIA

V tejto časti je vykonaná analýza vplyvu jednofázových fotovoltických elektrární inštalovaných v odberných miestach

koncových spotrebiteľov elektriny napájaných z distribučnej siete nízkeho napätia. Predmetná sieť je súčasťou poľskej distribučnej sústavy a je v nej pripojených 57 odberných miest. V desiatich odberných miestach sú inštalované fotovoltaické elektrárne.

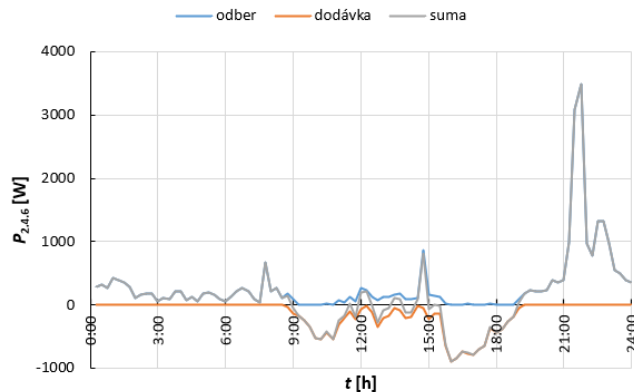
Jednotlivé fotovoltaické elektrárne sa líšia inštalovaným výkonom a počtom fáz. Tri fotovoltaické elektrárne sú k distribučnej sieti pripojené jednofázovo a sedem trojfázovo. Schéma distribučnej siete sa nachádza na Obr. 1.



- oranžová krivka znázorňuje dodávku činného výkonu do distribučnej siete nízkeho napätia (výroba elektrickej energie je v odbornom mieste väčšia ako spotreba),
- šedá krivka znázorňuje sumu dodávaného a odoberaného činného výkonu.

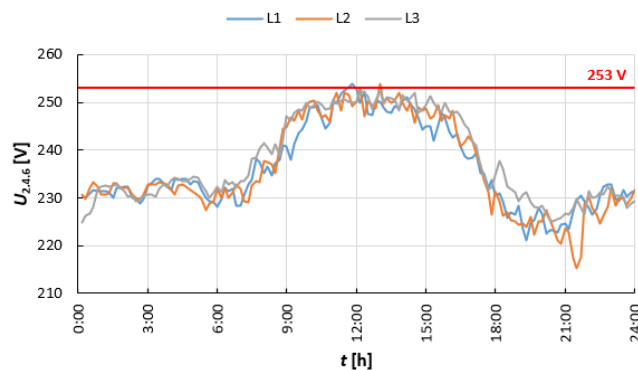
Analýza v odbornom mieste 2.4.6

V tomto odbornom mieste je jednofázová fotovoltaická elektrárňa pripojená do fázy L3. Inštalovaný výkon tejto fotovoltaickej elektrárne je 1,8 kW.



Obr. 2 Časový priebeh trojfázového činného výkonu prenášaného miestom pripojenia odborného miesta 2.4.6

Z časového priebehu trojfázového činného výkonu prenášaného miestom pripojenia na Obr. 2 je vidieť, že zhruba od 9:00 do 12:00 dokázala výroba elektrickej energie vo fotovoltaickej elektrárni pokryť spotrebu v odbornom mieste a nadbytočná vyrobená energia bola dodávaná do distribučnej sústavy. Rovnaká situácia nastala aj v období približne od 15:00 do 18:45, kedy maximálna hodnota výkonu dodávaného z odborného miesta do siete dosahovala až 900 W. V období medzi 12:00 a 15:00 však dochádzalo ku striedaniu odberu a dodávky energie zo/do sústavy, čoho príčinou mohlo byť zvýšenie odberu v danom odbornom mieste, ale aj zmena počasia, ktorá nepriaznivo ovplyvnila výrobu elektriny vo fotovoltaickej elektrárni.



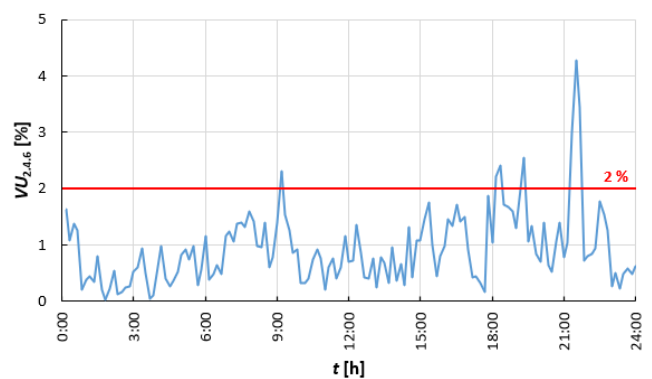
Obr. 3 Časový priebeh veľkosti napätia jednotlivých fáz v mieste pripojenia odborného miesta 2.4.6

Z časového priebehu napätí na Obr. 3 je vidieť, že veľkosť napätia v mieste pripojenia počas dňa postupne narastala približne od 8:00 do 12:00 a potom postupne klesala približne do 18:00. Za tento postupný nárast a pokles veľkostí napätí jednotlivých fáz je pravdepodobne

zodpovedná kombinácia nižšej spotreby v odborných miestach počas pracovného dňa a kumulatívny účinok výroby elektrickej energie v jednofázových a trojfázových fotovoltaických elektrárňach inštalovaných v celej distribučnej sústave.

V odbornom mieste 2.4.6 presiahla hodnota napätia maximálnu dovolenú hranicu 253 V iba v krátkom čase a to od 11:30 do 11:50, kedy mala fáza L1 napätie 254 V, a od 12:50 do 13:00, kedy mala fáza L2 napätie 253,8 V. Keďže je jednofázová fotovoltaická elektrárňa v tomto odbornom mieste pripojená do fázy L3, mohlo by sa zdať, že prevádzka fotovoltaickej elektrárne nemala negatívny vplyv na veľkosť napätia v mieste pripojenia, keďže veľkosť napätia vo fáze, do ktorej je fotovoltaická elektrárňa pripojená, je ako jediná počas celého dňa v požadovanom rozsahu. Podľa [12] však pripojenie jednofázovej fotovoltaickej elektrárne v odbornom mieste nespôsobuje nárast napätia v tej fáze, do ktorej je pripojená, ale výraznejšie ovplyvní veľkosti napätí v ďalších fázach. Keďže v reálnej prevádzke ovplyvňuje napätie v distribučnej sústave mnoho premenných, nie je možné jednoznačne povedať, či za zvýšenie napätia v spomínaných fázach nad dovolenú hranicu skutočne môže jednofázová fotovoltaická elektrárňa v danom odbornom mieste.

Z časového priebehu nesymetrie napätia na Obr. 4 je vidieť, že nesymetria napätia v mieste pripojenia odborného miesta k distribučnej sústave je vo väčšine dňa pod najvyššou dovolenou hodnotou. Počas dňa bola nesymetria napätia v mieste pripojenia mimo dovoleného rozsahu iba v ôsmich desaťminútových intervaloch, pričom sedem z nich bolo po 18:00. Najvyššia hodnota napät'ovej nesymetrie počas dňa bola od 21:20 do 21:30, kedy dosiahla hodnotu 4,3 %. Z uvedeného teda vyplýva, že problém s veľkosťou nesymetrie nenastával počas dňa, kedy bola v činnosti jednofázová fotovoltaická elektrárňa, ale podvečer a večer, kedy pravdepodobne dochádzalo k spínaniu výkonných jednofázových spotrebičov. Hodnota nesymetrie napätia v mieste pripojenia odborného miesta 2.4.6 k distribučnej sústave je však ovplyvňovaná aj inými odbornými miestami v sústave, preto tento nárast nesymetrie nemusel byť spôsobený iba činnosťou v konkrétnom odbornom mieste.



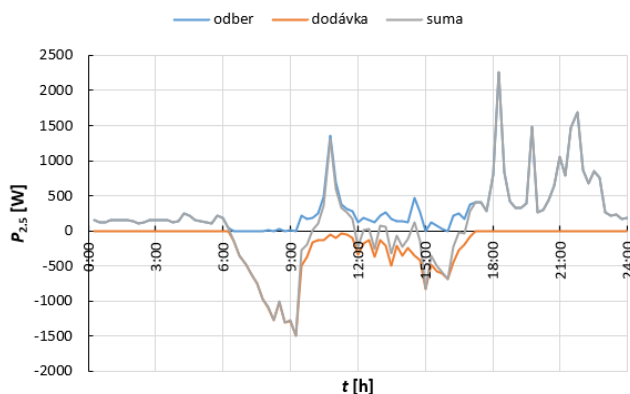
Obr. 4 Časový priebeh nesymetrie napätia v mieste pripojenia odborného miesta 2.4.6

Analýza v odbornom mieste 2.5

Jednofázová fotovoltaická elektrárňa v tomto odbornom mieste je pripojená do fázy L1, pričom jej výkon je 2,52 kW.

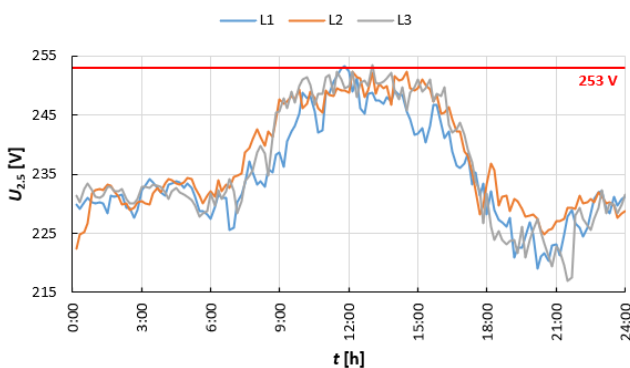
Priebeh trojfázového činného výkonu prenášaného miestom pripojenia odborného miesta 2.5 k distribučnej sústave je zobrazený na Obr. 5. Z časového priebehu je vidieť, že toky výkonov sa počas dňa často menili, čoho dôkazom je veľký počet časových intervalov

(najmä od 9:15 do 17:15), kedy dochádzalo aj k odberu aj k dodávke elektriny z resp. do distribučnej siete.

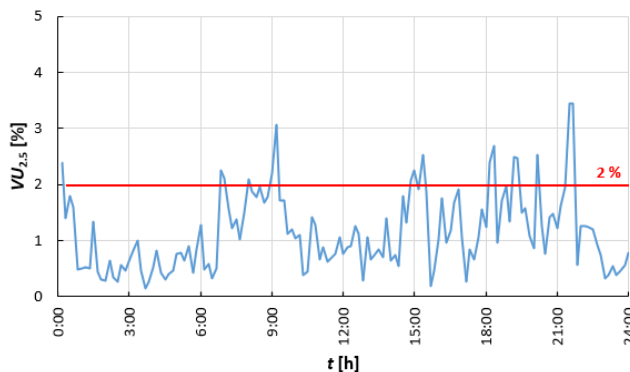


Obr. 5 Časový priebeh trojfázového činného výkonu prenášaného miestom pripojenia odberného miesta 2.5

Časový priebeh napätí jednotlivých fáz v mieste pripojenia odberného miesta 2.5 k distribučnej sústave sa nachádza na Obr. 6. Z priebehu napätí je vidieť, že veľkosť napätia presahovala maximálnu dovolenú hodnotu v priebehu dňa iba počas dvoch desaťminútových intervalov, konkrétne od 11:40 do 11:50, kedy veľkosť napätia fázy L1 bola 253,3 V, a od 12:50 do 13:00, kedy bola veľkosť napätia fázy L3 253,5 V.



Obr. 6 Časový priebeh veľkosti napätia jednotlivých fáz v mieste pripojenia odberného miesta 2.5



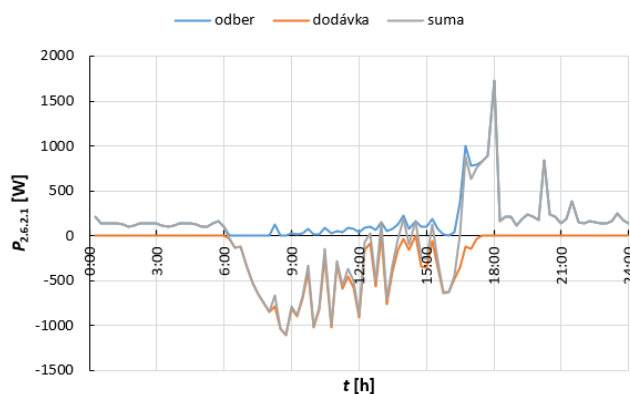
Obr. 7 Časový priebeh nesymetrie napätia v mieste pripojenia odberného miesta 2.5

Časový priebeh nesymetrie napätia v mieste pripojenia odberného miesta 2.5 k distribučnej sieti počas dňa sa nachádza na Obr. 7. Z priebehu je vidieť, že nesymetria napätia prekročila maximálnu dovolenú hodnotu počas dňa šesťnásťkrát, pričom najvyššiu hodnotu dosiahla medzi 21:20 a 21:30 a to 3,5 %.

Analýza v odbernom mieste 2.6.2.1

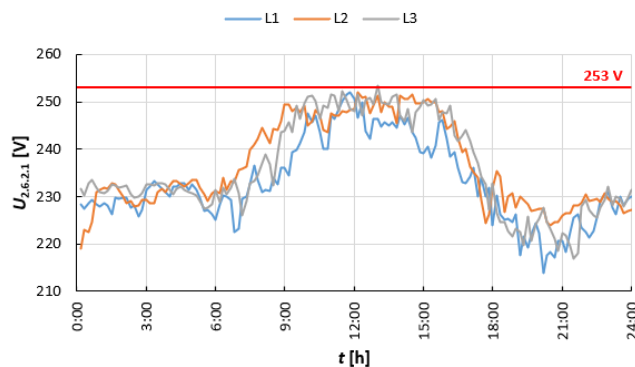
Jednofázová fotovoltaická elektrárňa v tomto odbernom mieste je pripojená do fázy L2, pričom jej výkon je 2,24 kW.

Časový priebeh trojfázového činného výkonu prenášaného miestom pripojenia tohto odberného miesta k distribučnej sústave je zobrazený na Obr. 8.



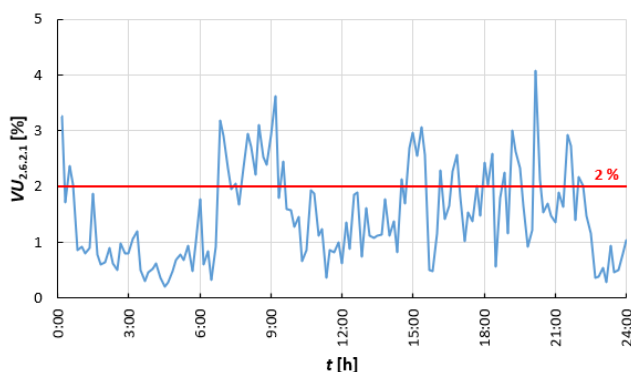
Obr. 8 Časový priebeh trojfázového činného výkonu prenášaného miestom pripojenia odberného miesta 2.6.2.1

Časový priebeh napätí jednotlivých fáz v mieste pripojenia odberného miesta 2.6.2.1 k distribučnej sústave sa nachádza na Obr. 9. Z Obr. 9 je vidieť, že v tomto odbernom mieste došlo k prekročeniu maximálnej prípustnej veľkosti napätia iba v jednom intervale od 12:50 do 13:00, kedy napätie fázy L3 dosiahlo hodnotu 253,4 V.



Obr. 9 Časový priebeh veľkosti napätia jednotlivých fáz v mieste pripojenia odberného miesta 2.6.2.1

Časový priebeh nesymetrie napätia v mieste pripojenia tohto odberného miesta k distribučnej sieti počas dňa sa nachádza na Obr. 10. Z časového priebehu je vidieť, že hodnota nesymetrie napätia počas dňa pravidelne prekračovala dovolený limit, pričom najvyššia hodnota nesymetrie bola 4,1 % v čase od 20:00 do 20:10.



Obr. 10 Časový priebeh nesymetrie napätia v mieste pripojenia odberného miesta 2.6.2.1

III. ZÁVER

Z analýzy dát zozbieraných inteligentnými elektromermi nainštalovanými v reálnej sieti nízkeho napätia v poľskej distribučnej sústave, ktorej cieľom bolo preskúmať súvislosť medzi činnosťou jednofázových fotovoltických elektrární a kvalitou elektrickej energie v mieste pripojenia, vyplýva, že aj keď je možné predpokladať, že prevádzka jednofázových fotovoltických elektrární má vplyv na kvalitatívne ukazovatele elektrickej energie v mieste pripojenia, zo získaných dát nie je možné túto súvislosť priamo pozorovať.

V reálnej prevádzke ovplyvňuje kvalitatívne ukazovatele elektrickej energie v distribučnej sústave množstvo faktorov, medzi ktoré patrí napríklad nepredvídateľné správanie užívateľov siete (náhodné spínanie záťaží) či rôznorodosť elektrických zariadení inštalovaných v sústave (spotrebiče – indukčné, kapacitné alebo odporové, zdroje elektrickej energie atď.). Okrem toho je v odberných miestach analyzovanej distribučnej sústavy inštalovaných viacero jednofázových a trojfázových fotovoltických elektrární, ktorých výroba sa vyznačuje značnou fluktuáciou v dôsledku závislosti od počasia. Fotovoltické elektrárne s vyšším výkonom môžu spoľahlivo pokrývať spotrebu v odberných miestach, v ktorých sú inštalované, pričom v prípade prebytku energiu dodávajú do distribučnej siete, no pri rýchlej zmene počasia môže nastať situácia, keď výroba klesne na nízku hodnotu, spotrebu v odbernom mieste už nedokáže výroba vo fotovoltickej elektrárni pokryť, a tak spotrebiče začnú odoberať výkon z distribučnej siete. Aj takéto náhle zmeny ovplyvňujú sledované kvalitatívne parametre v distribučnej sústave, a to nielen v mieste pripojenia, ale v celej sústave, preto izolovať vplyv jednej jednofázovej fotovoltickej elektrárne na kvalitatívne parametre v mieste pripojenia je pomerne náročné.

Pre lepšie pochopenie, ako prevádzka jednofázových fotovoltických elektrární vplýva na vybrané kvalitatívne parametre elektrickej energie, je lepšie využiť simulačný program, v ktorom, na modeli distribučnej siete s odbernými miestami a inštalovanými jednofázovými fotovoltickými elektrárnami, je možné v rámci ustáleného chodu jasne definovať, ako výroba vo fotovoltickej elektrárni ovplyvní konkrétny parameter v konkrétnom mieste sústavy.

POĎAKOVANIE

Tento článok bol podporený Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky na základe zmluvy VEGA 1/0532/25.

LITERATÚRA

- [1] Z. Łukasik and Z. Olczykowski, "Quality and reliability of electricity supply," in 2020 ELEKTRO, Taormina, Italy, 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/ELEKTRO49696.2020.9130127.
- [2] Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, EN 50160, 2022.
- [3] Úrad pre reguláciu sieťových odvetví, "Vyhláška Úradu pre reguláciu sieťových odvetví, ktorou sa mení a dopĺňa vyhláška Úradu pre reguláciu sieťových odvetví č. 236/2016 Z. z., ktorou sa ustanovujú štandardy kvality prenosu elektriny, distribúcie elektriny a dodávky elektriny," *Zbierka zákonov Slovenskej republiky*, č. 317/2024 Z. z., 2024. [Online]. Dostupné: https://static.slovlex.sk/pdf/SK/ZZ/2024/317/ZZ_2024_317_20250101.pdf
- [4] J.-G. Kim, E.-W. Lee, D.-J. Lee, and J.-H. Lee, "Comparison of voltage unbalance factor by line and phase voltage," in *Proceedings of the 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Nanjing, China, 2005, pp. 1998–2001, vol. 3, doi: 10.1109/ICEMS.2005.202910.
- [5] A. K. Singh, G. K. Singh, and R. Mitra, "Some Observations on Definitions of Voltage Unbalance," in 2007 39th North American Power Symposium, Las Cruces, NM, USA, 2007, pp. 473–479, doi: 10.1109/NAPS.2007.4402352.
- [6] "Definitions of Voltage Unbalance," in *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, no. 5, pp. 49–51, May 2001, doi: 10.1109/MPER.2001.4311362.
- [7] A. M. El-Bashbishi and A. A. El-Fergany, "Calculation Methods of Voltage Unbalance Factor," in 2023 24th International Middle East Power System Conference (MEPCON), Mansoura, Egypt, 2023, pp. 1–6, doi: 10.1109/MEPCON58725.2023.10462408.
- [8] K. Girigoudar, D. K. Molzahn, and L. A. Roald, "On the relationships among different voltage unbalance definitions," in *2019 North American Power Symposium (NAPS)*, Wichita, KS, USA, 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/NAPS46351.2019.9000231.
- [9] Abu Dhabi Distribution Company, Al Ain Distribution Company, and Abu Dhabi Supply Company for Remote Areas (RASCO), "Limits for Voltage Unbalance in the Electricity Supply System," *Engineering Recommendation No. 10 of the Electricity Distribution Code*, Version 1.0, 2005. [Online]. Dostupné: <https://www.aadc.ae/img/bfc668e4-34b2-41e9-b417-111c607d94ac.pdf>
- [10] K. Girigoudar, and L. A. Roald, "On the impact of different voltage unbalance metrics in distribution system optimization," *Electric Power Systems Research*, vol. 189, art. no. 106656, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106656.
- [11] IEEE, "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants," *IEEE Std 141-1993*, pp. 1–768, 29 Apr. 1994, doi: 10.1109/IEEESTD.1994.121642.
- [12] K. Eliáš, "Určenie spätných vplyvov obnoviteľných zdrojov energie na distribučnú sústavu," *Diplomová práca*, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Košice, Slovensko, 2024.

ADRESY AUTOROV

Kristián Eliáš, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, 04210, Slovenská republika, kristian.elias@tuke.sk
 Rafał Kurdyła, Politechnika Rzeszowska, Wydział elektrotechniki i informatyki, ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów, Poľská republika, d567@stud.prz.edu.pl
 Július Šimčák, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, 04210, Slovenská republika, julius.simcak@tuke.sk
 Ľubomír Beňa, Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, 04210, Slovenská republika, lubomir.bena@tuke.sk