

Kristián Eliáš, Ľubomír Beňa, František Margita, Július Šimčák, Ardian Hyseni

Vplyv prevádzkového účinníka fotovoltických elektrární na napäťový profil a činné straty v distribučnej sústave nízkeho napätia

V dôsledku energetickej politiky Európskej únie dnes v jej jednotlivých členských štátoch dochádza k čoraz väčšiemu využívaniu obnoviteľných zdrojov energie. Medzi oblasti, kde obnoviteľné zdroje energie zažívajú prudký rozvoj patrí aj oblasť výroby elektrickej energie. Čoraz viac domácností či menších firiem napájaných z distribučnej sústavy nízkeho napätia do svojho odberného miesta inštaluje fotovoltické elektrárne. Tieto elektrárne však ovplyvňujú distribučnú sústavu, do ktorej sú pripojené. Účelom tohto príspevku je preukázať, ako prevádzkový účinník fotovoltickej elektrárne ovplyvňuje napäťový profil siete a straty v nej. Štúdia bola realizovaná na hypotetickom modeli distribučnej siete nízkeho napätia a pre výpočet ustáleného chodu bola použitá Backward/Forward Sweep metóda. Výsledky štúdie ukazujú, že optimálna hodnota účinníka z pohľadu nárastu napätia a z pohľadu nárastu strát sa odlišuje, preto je pri voľbe prevádzkového účinníka fotovoltickej elektrárne nutné zohľadniť konkrétny zámer voľby hodnoty účinníka.

Kľúčové slová: fotovoltické elektrárne, distribučná sústava, účinník, napäťový profil, činné straty

I. ÚVOD

V čoraz väčšom počte odberných miest napájaných z distribučných sústav nízkeho napätia v súčasnosti dochádza k inštalácii fotovoltických elektrární (FVE). Tie môžu koncovým spotrebiteľom elektrickej energie pomôcť so znížením závislosti od konvenčného spôsobu napájania a tiež znížiť účty za spotrebovanú elektrickú energiu [1,2]. Prevádzka FVE pracujúcej paralelne s distribučnou sústavou však ovplyvňuje jej prevádzkové veličiny, ako sú napätie, prúdy či straty [3]. Veľkosť napätia v distribučnej sústave nízkeho napätia by mala byť podľa medzinárodnej normy EN 50160 pri normálnych prevádzkových podmienkach v rozmedzí $U_n \pm 10\%$, t. j. v rozmedzí 207 až 253 V [4]. Maximálny dovolený prúd tečúci vedením je zasa daný fyzikálnymi vlastnosťami vodiča. Z pohľadu strát je optimálne, ak je ich hodnota minimálna.

Koncový odberateľ elektrickej energie platí za spotrebovanú elektrinu cenu, ktorá pozostáva z troch hlavných zložiek:

- komodita – 40 %,
- prenos a distribúcia – 34 %,
- dane a poplatky – 26 %.

Zložka prenos a distribúcia pozostáva podrobnejšie z:

- poplatku za systémové služby TSS – 6 %
- poplatku za prenos elektriny prenosovou sústavou – 3 %,
- poplatku za distribúciu elektriny – 20 %,
- poplatku za straty vznikajúce pri distribúcii elektrickej energie – 5 %. [6]

Z vyššie uvedeného vyplýva, že približne 5 % z koncovej ceny elektriny platí koncový spotrebiteľ za straty vznikajúce pri distribúcii elektriny. Ak by teda prevádzka FVE inštalovaných v distribučnej sústave nízkeho napätia zvyšovala straty na vedeniach, potom by potenciálne mohla byť nepriaznivo ovplyvnená aj koncová cena elektriny.

Keďže v distribučných sústavách nízkeho napätia je dominantnou zložkou impedancie vedenia činný odpor R , potom je možné uvažovať

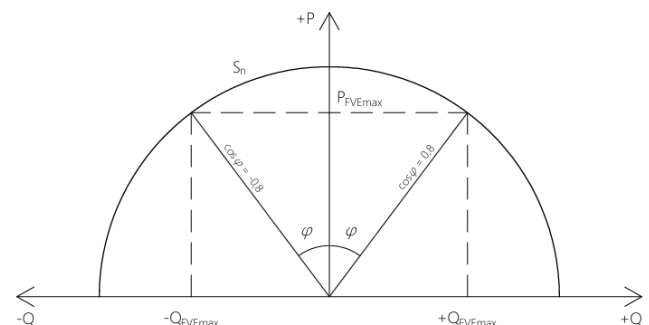
so zjednodušením, že straty na vedení sú dané iba činnými stratami ΔP . Tie je možné vypočítať podľa vzťahu:

$$\Delta P = R \cdot I^2 \quad (1)$$

kde: ΔP – činné straty [W], R – rezistencia vedenia [Ω], I – veľkosť prúdu tečúceho vedením [A].

Veľkosť prúdu tečúceho vedením je určená spotrebou v jednotlivých odberných miestach distribučnej sústavy, ale aj výrobou vo FVE. Vyrobená energia vo FVE môže čiastočne alebo úplne pokryť spotrebu v odbernom mieste, čím dôjde k odľahčeniu vedenia a zníženiu prúdu tečúceho vedením. Pri prebytku výroby však dochádza k dodávke výkonu do elektrickej siete, čo môže prúd tečúci vedením zvýšiť, čoho následkom sú aj vyššie straty.

FVE typicky pozostáva z fotovoltických panelov, montážneho príslušenstva, kabeláže, DC rozvádzača, AC rozvádzača a strieďača. Nastavenie strieďača čiastočne určuje spätný vplyv FVE ako celku na sieť. Na Obr. 1. sa nachádza PQ diagram strieďača [7,8], kde polkružnica S_n znázorňuje menovitý zdanlivý výkon strieďača. Priamka výkonu $P_{FVE\max}$ predstavuje maximálny činný výkon FVE, ktorý môže strieďač dodávať do siete pri účinníku FVE $\cos \varphi = \pm 0,8$ s ohľadom na menovitý zdanlivý výkon strieďača S_n .



Obr. 1. PQ diagram strieďača

Väčšina strieďačov umožňuje určiť fixnú hodnotu účinníka, pri ktorom má byť dodávaný výkon z FVE do siete. Rozsah, v ktorom je

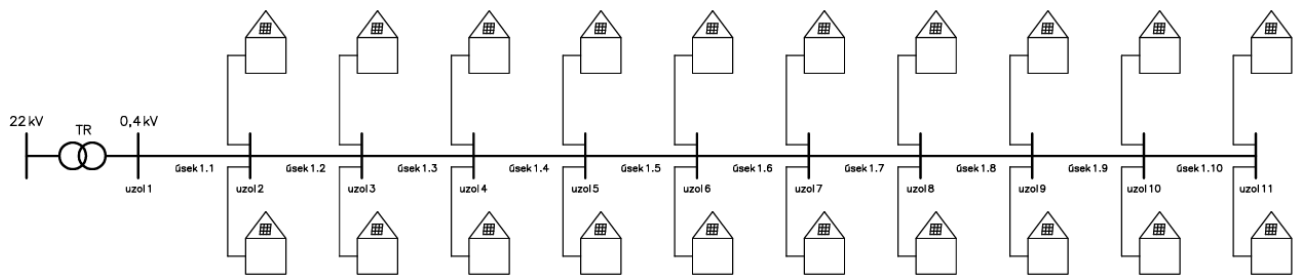
možné účinník nastaviť, závisí od konkrétneho striedača. Pre väčšinu striedačov však platí, že účinník sa môže pohybovať v rozmedzí od $\cos \varphi = -0,8$ (indukčný) do $\cos \varphi = +0,8$ (kapacitný) (napr.: [9,10]). Pri zápornom účinníku dochádza k odberu jalového výkonu zo siete a pri kladnom účinníku dochádza k dodávke jalového výkonu do siete. Pri účinníku $\cos \varphi = 1$ sa do siete dodáva iba činný výkon.

Pri konštantnom dodávanom činnom výkone sa v závislosti od hodnoty účinníka mení jalový výkon, čím dochádza aj k vplyvu na prúd tečúci vedením. Prúd tečúci impedanciou vedenia spôsobuje straty a tiež úbytok napätia, čím dochádza k vplyvu na napäťový profil siete.

Cieľom tohto príspevku je preskúmať, ako hodnota prevádzkového účinníka FVE pôsobí na tieto veličiny.

II. METODIKA

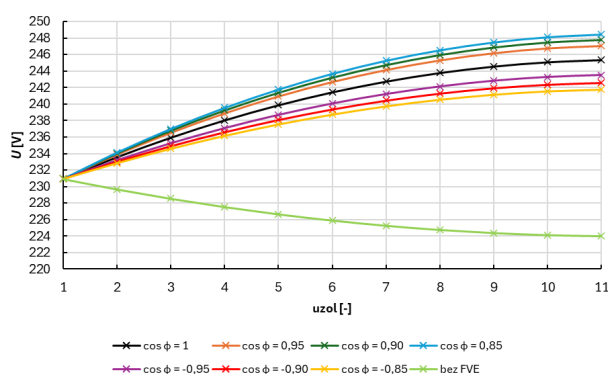
Pre túto štúdiu bola vytvorená hypotetická modelová sieť nízkeho napätia zobrazená na Obr. 2., ktorá obsahuje 20 odberných miest s inštalovanou FVE. Činný výkon FVE bol zvolený 10,8 kW, čo odpovedá malému zdroju definovanému v zákone č. 309/2009 Z. z. [11].



Obr. 2. Schéma modelovanej distribučnej siete nízkeho napätia

III. VÝSLEDKY

Obr. 3. zobrazuje napäťový profil modelovanej distribučnej siete nízkeho napätia pre všetky výpočtové scenáre.



Obr. 3. Napäťový profil distribučnej siete nízkeho napätia v jednotlivých výpočtových scenároch

Z Obr. 3. vyplýva, že v prípade, kedy v jednotlivých odberných miestach nie sú inštalované FVE, fázové napätie klesá so vzdialenosťou od bilančného uzla. V tomto prípade dochádza k toku prúdu od bilančného uzla smerom ku koncu vedenia, kedy prúd vytvára na jednotlivých úsekoch úbytok napätia, čoho následkom je postupné klesanie napätia od bilančného až k poslednému uzlu na

Modelovaná sieť nízkeho napätia pozostáva z 10 uzlov (uzol 2 až uzol 11), ktoré vychádzajú z bilančného uzla (uzol 1). Hodnota fázového napätia v bilančnom uzle je 230 V. Uzly 2 až 11 sú rozmiestnené rovnomerne pozdĺž vedenia vo vzájomných vzdialenostiach 40 metrov. V každom uzle sa nachádzajú dve odberné miesta s inštalovanou FVE a odberom 3,326 kW ($\cos \varphi = 1$).

Vedenie je vyhotovené samonosným káblom, ktorého parametre sú uvedené v TABUŁKE I.

TABUŁKA I
Parametre vedenia

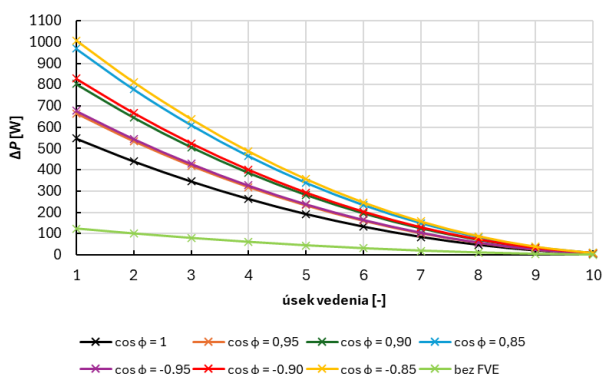
typ	R [Ω/km]	X [Ω/km]	I _n [A]
NFA2X4x95	0.32	0.083	240

Na výpočet ustáleného chodu bola použitá Backward/Forward Sweep metóda [12] implementovaná do MATLABU. Počas výpočtov bol menený účinník FVE v rozsahu od $\cos \varphi = -0,85$ do $\cos \varphi = +0,85$ s krokom 0,05, pričom pre každú hodnotu účinníka boli vypočítané fázové napätia v jednotlivých uzloch siete a činné straty vznikajúce v úsekoch jednotlivých vedení.

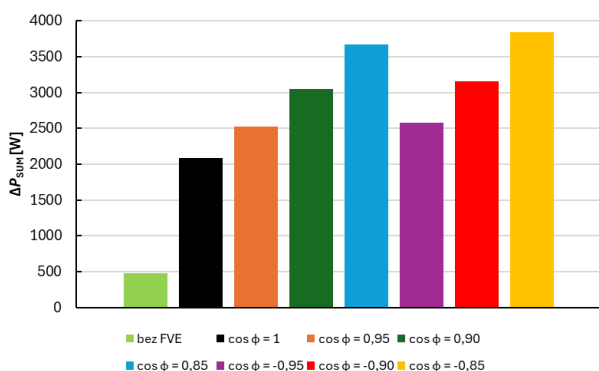
vedení. Pri pripojených FVE do jednotlivých odberných miest v distribučnej sieti naopak napätie postupne so vzdialenosťou uzla od začiatku vedenia narastá. Tento účinok je dôsledkom prebytku výroby vo FVE, ktoré pokrývajú celú spotrebu v odberných miestach, pričom prebytok vyrobenej energie injektujú do siete.

Z Obr. 3. tiež vyplýva, že prevádzka FVE s indukčným účinníkom spôsobuje menší nárast napätia v jednotlivých uzloch siete v porovnaní prevádzky FVE s jednotkovým poprípadne kapacitným účinníkom. Tento účinok je spôsobený odberom jalovej energie zo siete, kedy výsledný prúd tečúci úsekmi jednotlivých vedení je menší ako v prípade prevádzky FVE s účinníkom 1 resp. kapacitným účinníkom.

Na Obr. 4. sa nachádza priebeh činných strát na vedení pre jednotlivé výpočtové scenáre a Obr. 5. prezentuje sumárne činné straty na celom vedení. Z Obr. 4. vyplýva, že straty na jednotlivých úsekoch vedenia klesajú so vzdialenosťou úseku od bilančného uzla, keďže aj úsekový prúd klesá so vzdialenosťou od začiatku vedenia. V stave bez inštalovaných FVE v jednotlivých odberných miestach sú straty na jednotlivých úsekoch vedení viditeľne menšie v porovnaní so stavom s inštalovanými FVE, čo potvrdzuje aj graf na Obr. 5. V stave bez FVE sú sumárne činné straty v modelovanej sieti približne 477 W, zatiaľ čo v prípade s pripojenými FVE s jednotkovým účinníkom je to približne 2081 W, čo je nárast o približne 436 %. Z Obr. 4. a Obr. 5 je tiež vidieť, že straty pri kapacitnom alebo indukčnom účinníku rovnakej hodnoty sú veľmi podobné, no pri indukčnom účinníku sú o niečo vyššie.



Obr. 4. Straty činného výkonu na jednotlivých úsekoch vedenia v jednotlivých výpočtových scenároch



Obr. 5. Sumárne činné straty v modelovanej sieti v jednotlivých výpočtových scenároch

IV. ZÁVER

Cieľom tohto príspevku bolo preskúmať, ako prevádzkový účinník FVE ovplyvňuje napäťový profil a straty činného výkonu v distribučnej sieti nízkeho napätia. Aj keď sú FVE ekologický zdroj elektrickej energie poskytujúci čiastočnú nezávislosť koncových odberateľov elektriny od verejnej elektrickej siete, ich integrácia a prevádzka je spojená s určitým vplyvom na distribučnú sieť, do ktorej sú pripojené. Z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že ak elektrická energia vyrobená vo FVE pokryje celú spotrebu odberného miesta a zvyšnú energiu injektuje do elektrickej siete, potom môže dôjsť k nepriaznivému nárastu napätia a strát v distribučnej sieti. Nedovolený nárast napätia môže spôsobiť nesprávnu funkciu elektrických zariadení poprípade ich poškodenie. Nárast strát v distribučnej sieti môže potenciálne ovplyvniť koncovú cenu elektrickej energie, a tiež znegovať myšlienku efektívneho využívania energií. Z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že z pohľadu nárastu napätia v distribučnej sieti je výhodné FVE prevádzkovať s čo najnižším indukčným účinníkom. Z pohľadu strát činného výkonu je zasa najvýhodnejšie prevádzkovať FVE s jednotkovým účinníkom.

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] European Commission, "Solar energy," [online]. Dostupné na: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/solar-energy_en?prefLang=sk. Citované: 16. apríl 2025.
- [2] European Commission, "EU Solar Energy Strategy," COM(2022) 221 final, Brussels, May 18, 2022. [online]. Dostupné na: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:516a902d-d7a0-11ec-a95f-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF. Citované: 16. apríl 2025.
- [3] K. Eliáš, "Určenie spätných vplyvov obnoviteľných zdrojov energie na distribučnú sústavu," Diplomová práca, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Košice, Slovensko, 2024.
- [4] Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, EN 50160, 2022.
- [5] 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.
- [6] Východoslovenská distribučná, a.s., "Ceny do vrečka 2025 – domácnosti," [online]. Dostupné na: https://www.vsd.sk/mdoc/dso.L0000.A/doc/ceny_do_vrecka_2025_VSD.pdf. Citované: 23. október 2025.
- [7] A. Ali, D. Raisz, and K. Mahmoud, "Sensitivity-based and optimization-based methods for mitigating voltage fluctuation and rise in the presence of PV and PHEVs," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 27, 2017, doi: 10.1002/etep.2456.
- [8] J. Ishaq, Y. T. Fawzy, T. Buelo, B. Engel, and R. Witzmann, "Voltage control strategies of low voltage distribution grids using photovoltaic systems," in 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Leuven, Belgium, 2016, pp. 1–7, doi: 10.1109/ENERGYCON.2016.7513881.
- [9] Solax Power, "X3-PRO G2," [online]. Dostupné na: https://www.mobler.cz/user/related_files/solaxs_solax_x3_pro_g2_8-30k-cz.pdf. Citované: 23. október 2025.
- [10] Growatt, "MID 11~20KTL3-XH," [online]. Dostupné na: https://www.mobler.cz/user/related_files/mid-1120ktl3-xh_eu_cz_solosol_vz_compressed-2.pdf. Citované: 23. október 2025.
- [11] Národná rada Slovenskej republiky, „Zákon č. 309/2009 Z. z. o podpore obnoviteľných zdrojov energie a vysoko účinnej kombinovanej výroby a o zmene a doplnení niektorých zákonov," *Úradný vestník Slovenskej republiky*, 2009. [online]. Dostupné na: <https://www.slovlex.sk/ezbierky/pravne-predpisy/SK/ZZ/2009/309/>. Citované: 23. október 2025.
- [12] S. Mishra, "A simple algorithm for unbalanced radial distribution system load flow," in *TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference*, Hyderabad, India, 2008, pp. 1–6, doi: 10.1109/TENCON.2008.4766498.

ADRESY AUTOROV

Kristián Eliáš, Technická univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, 040 01, Slovenská Republika, kristian.elias@tuke.sk
 Ľubomír Beňa, Technická univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, 040 01, Slovenská Republika, lubomir.bena@tuke.sk
 František Margita, Technická univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, 040 01, Slovenská Republika, frantisek.margita@tuke.sk
 Július Šimčák, Technická univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, 040 01, Slovenská Republika, julius.simcak@tuke.sk
 Ardian Hyseni, Technická univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, 040 01, Slovenská Republika, ardian.hyseni@tuke.sk