

SAULĖS ELEKTRINIŲ ĮTAKA SKIRSTOMOJO TINKLO ELEKTROS ENERGIJOS KOKYBEI

Kristina ŠEĖRIENĖ, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: kristina.seferiene@stud.vdu.lt

Kęstutis NAVICKAS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: kestutis.navickas@vdu.lt

Santrauka

Saulės energetikos tinklo plėtra suteikia galimybę fotovoltinėse elektrinėse pagamintai energijai patekti į nacionalinius skirstomuosius tinklus. Dėl šios svarbios technologijos optimizuojamas elektros energijos tiekimo balansas, padidinamas fotovoltinės sistemos ekonomiškumas, sumažinamos eksploatacinės išlaidos ir suteikiama pridėtinė vertė vartotojui bei skirstomojo tinklo operatoriui. Didėjanti atsinaujinančios energijos dalis, kurią reikia integruoti į elektros energijos sistemas, sukelia inžinerinių iššūkių, tokių kaip elektros energijos kokybės pokyčiai, pralaidumo pajėgumų apribojimai, saugos priemonės, sinchronizacijos procesai, sistemos inercija ir pan. Šiame darbe buvo tiriama elektros energijos kokybė skirstomajame 0,4 kV tinkle su integruotomis saulės elektrinėmis. Tyrimui pasirinkta 843 m ilgio 0,4 kV oro linija ir 360 m kabelių linijos atkarpa, prie kurių prijungti 35 elektros energijos vartotojai ir 8 saulės elektrinės. Linijoje prijungtų elektros energijos vartotojų leistina naudoti galia yra 305 kW, o saulės elektrinių leistina generuoti galia siekia 72 kW. Šiame tyrime nustatyti įtampų nuokrypiai vartotojų įvaduose kintant apkrovoms linijoje ir saulės elektrinių generuojamai galiai. Darbe pateikta vienos savaitės prie tiriamoje linijoje prijungtų vartotojų elektros energijos suvartojimo ir generavimo pokyčių bei įtampos nuokrypių analizė. Per savaitę generuojantys vartotojai į operatoriaus tinklus pateikė 6919 kWh, o iš jų sunaudojo apie 3553 kWh elektros energijos. Įtampos nuokrypiai transformatorinėje tiriamu laikotarpiu buvo nedideli. Reikšmingiausias fazinių įtampų pokytis pastebėtas dienos metu, esant didžiausiai gaminančių vartotojų generuojamai galiai. Fazinių įtampų asimetriją transformatorinėje ir gaminančio vartotojo įvade beveik nepriklauso nuo saulės elektrinės darbo grafiko.

Reikšminiai žodžiai: saulės elektrinė, skirstomasis elektros tinklas, elektros energijos kokybė.

Įvadas

Saulės energija yra viena švariausių atsinaujinančių energijos išteklių, todėl jos plėtra gali ženkliai prisidėti prie šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų mažinimo. 2024 m. pabaigoje pasauliniai atsinaujinančiosios energijos pajėgumai siekė 4448 GW. Atsinaujinančiosios energijos gamybos pajėgumai vien per 2024 m. padidėjo 585 GW (+15,1 %). Daugiau nei tris ketvirtadalius pajėgumų padidėjimo lėmė saulės energija, kurios padaugėjo 452 GW (+32,2 %). Saulės energija, kaip ir ankstesniais metais, sudarė didžiausią pasaulinės bendros gamybos dalį – 1865 GW (IRENA, 2025). Atsinaujinančioji hidroenergija ir vėjo energija taip pat ženkliai prisidėjo prie bendrosios galios didinimo ir atitinkamai siekė 1283 GW ir 1133 GW (IRENA, 2025). Savitas saulės energijos konversijos pobūdis sukelia rimtų iššūkių dėl generuojamos energijos efektyvaus panaudojimo. Nepastovus energijos gamybos pobūdis reikalauja patikimo atsarginio maitinimo šaltinio, kad būtų palaikomas pastovus energijos tiekimas. Naujovės, įskaitant pažangiuosius tinklus, elektros energijos akumuliaciją ir pan., gali valdyti energijos srautus. Tačiau norint išplėsti šias technologijas reikia papildomų investicijų į infrastruktūrą ir mokslinius tyrimus bei plėtrą (International Energy Forum, 2024).

Sparčiai auga gaminančių vartotojų skaičius: palyginti su 2024 m., 2025 m. augo beveik 45 %. Gaminantys vartotojai 2025 m. į tinklą patiekė 1,4 TWh energijos, kai 2024 m. šis skaičius siekė 1 TWh. Šiai dienai visų gaminančių vartotojų įrengtoji galia siekia apie 2,2 GW, o leistina generuoti galia – 1,8 GW. Vien per 2025 m. prijungtų gaminančių vartotojų įrengtoji galia sudarė apie 567 MW, iš jų 174 MW priskirta nutolusiems gaminantiems vartotojams (IRENA, 2026). Saulės elektrinių generacija 2025 m. siekė 1,64 TWh ir buvo didesnė, nei metinė saulės elektrinių generacija 2020–2024 metais (0,11–1,27 TWh) (LEA, 2025). Vien per 2025 m. gruodį prijungta 3 tūkst. gaminančių vartotojų, kurie bendrai pridėjo 40,7 MW įrengtos galios (leistina generuoti galia siekė 16 MW), o nutolusiems gaminantiems vartotojams buvo priskirta 4,4 MW galios. Visų gaminančių vartotojų metinė generacija preliminariai siekia iki 10 GWh. Per 2025 m. gruodžio mėn. buvo sulaukta 2,5 tūkst. gaminančių vartotojų paraiškų: iš jų 2,1 tūkst. – naujų, o 368 klientai didinosi turimą galią (ESO, 2026).

Saulės energetikos tinklo plėtra suteikia galimybę fotovoltinei energijai prisijungti prie nacionalinių skirstomųjų tinklų. Šios svarbios technologijos dėka optimizuojamas energijos tiekimo balansas, padidina fotovoltinės sistemos ekonomiškumą, sumažina eksploatacines išlaidas ir suteikia pridėtinės vertės vartotojui bei skirstomojo tinklo operatoriui (Sterling et al., 2013). Didėjanti atsinaujinančios energijos dalis, kurią reikia integruoti į elektros energijos sistemas, sukelia techninių problemų, tokių kaip elektros energijos kokybės reikalavimai, pajėgumų ribos, saugos priemonės, saugumas, apsaugos sistemos, sinchronizacijos procesas, mažesnė sistemos inercija ir kt (Abdalla & Mostafa, 2019).

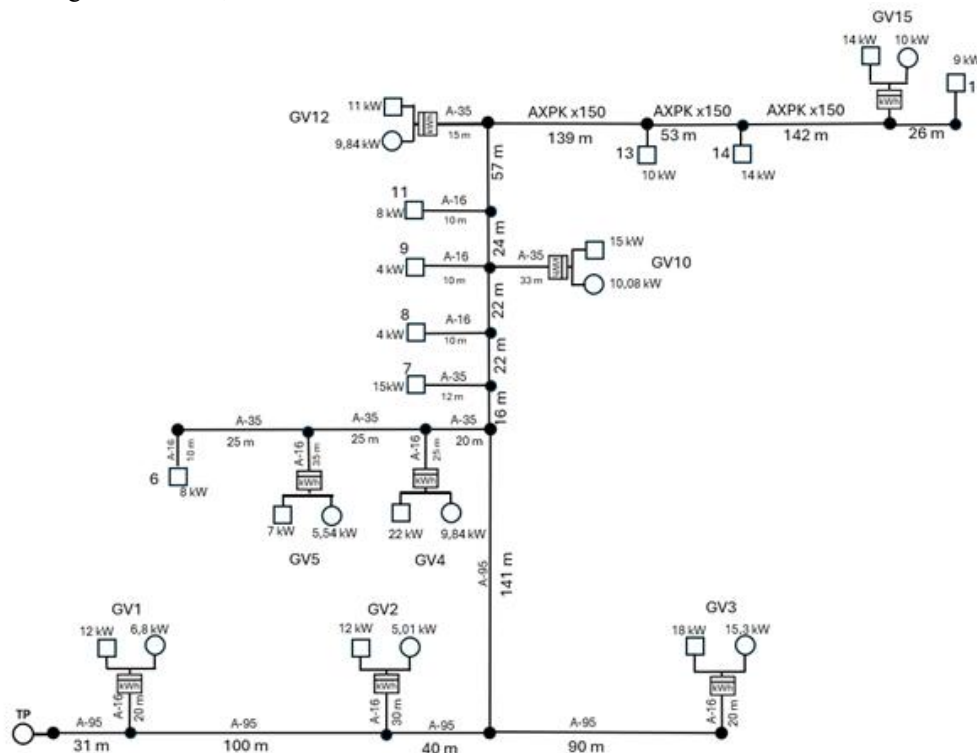
Tyrimo tikslas – įvertinti skirstomajame tinkle prijungtų saulės elektrinių įtaką elektros energijos kokybei.

Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Atlikti pasirinkto skirstomojo tinklo su prijungtomis saulės elektrinėmis apkrovų analizę.
2. Įvertinti saulės elektrinių poveikį skirstomojo tinklo elektros energijos kokybei.

Tyrimų objektas ir metodai

Šiame darbe buvo tiriama elektros energijos kokybė skirstomajame 0,4 kV tinkle su integruotomis saulės elektrinėmis. Tyrimui pasirinkta 843 m ilgio 0,4 kV oro linija ir 360 m kabelių linijos atkarpa, prie kurių prijungta 16 elektros energijos vartotojų, 8 iš jų yra gaminantys vartotojai su saulės elektrinėmis (žr. 1 pav.). Oro linijose sumontuoti A-95 (543 m), A-35 (130 m) ir A-16 (170 m) laidai. Kabelinėms linijoms panaudotas AXPX-150 kabelis. Elektros energijos vartotojų leistina naudoti galia pasiskirsčiusi 4 – 22 kW ribose. Saulės elektrinių leistoji generuoti galia pasiskirsčiusi 5,01 – 15,3 kW ribose. Visos linijoje prijungtos saulės elektrinės yra prijungtos atitinkamų vartotojų prijungimo taške. Linijoje prijungtų elektros energijos vartotojų leistina naudoti galia yra 183 kW, o saulės elektrinių leistina generuoti galia siekia 73,13 kW.



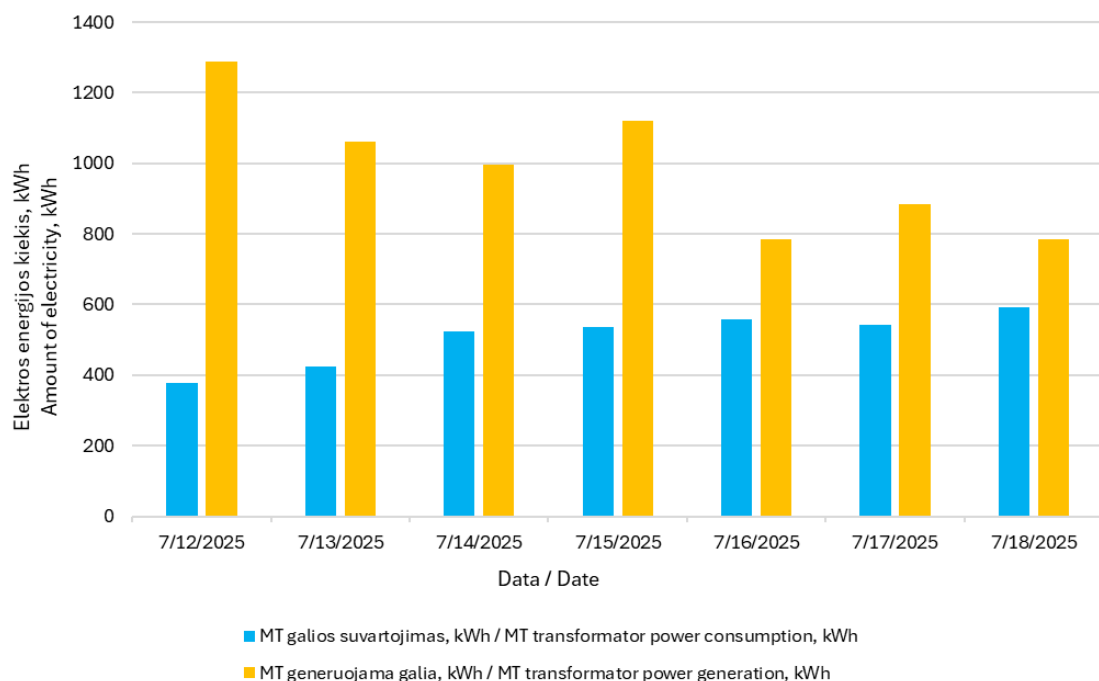
1 pav. Skirstomojo tinklo linijos su prijungtomis saulės elektrinėmis schema

Fig. 1. Diagram of a distribution network line with connected solar power plants

Šiame darbe linijos ir elektros energijos vartotojų naudojama ir saulės elektrinių generuojama galia, fazinės įtampos vartotojų ir transformatorinės pastotės gnybtuose buvo matuojamos ir analizuojamos maksimalios saulės energinės apšvietos laikotarpiu 2025 m. liepos 12–15 d. Transformatorinėje buvo įrengtas kontrolinis matavimo prietaisas T211 253880853, matuojantis ir registruojantis importuotą ir eksportuotą aktyviąją energiją, importuotą ir eksportuotą aktyviąją galią, momentines fazines įtampas, momentinę srovę. Šio matavimo prietaiso matavimo ribos nominali įtampa – 3x230/400 V, nominalus dažnis – 50 Hz, minimali srovė – 5 A, atskaitos srovė – 5 A, maksimali srovė – 100 A, tikslumo klasė – Cl.B. Gaminančių vartotojų įvaduose įrengti išmanūs elektros energijos skaitikliai T211 253880853, kurių matavimo ribos nominali įtampa – 3x230/400 V, nominalus dažnis – 50 Hz, minimali srovė – 5 A, atskaitos srovė – 5 A, maksimali srovė – 100 A, tikslumo klasė – Cl.B.

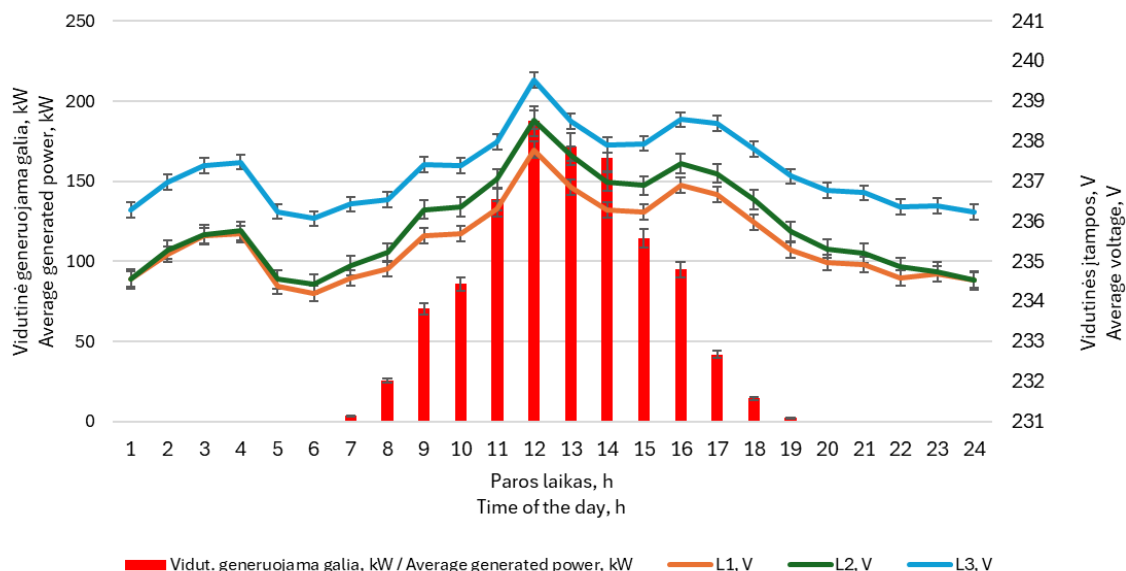
Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Šiame darbe pateikta vienos savaitės prie tiriamoje linijoje prijungtų vartotojų elektros energijos suvartojimo ir generavimo pokyčių analizė. Per savaitę (nuo 2025 m. liepos 12 d. iki liepos 18 d.) generuojantys vartotojai į operatoriaus tinklus pateikė 6919 kWh, o iš jų gavo apie 3553 kWh elektros energijos. Vadinasi, tiriamuoju laikotarpiu linijoje prijungti gaminantys vartotojai patenkino savuosius ir padengė kitų, prie linijos prijungtų vartotojų, elektros energijos poreikius. Nustatyta, kad dienos vartojimo pokyčiai kito 376–593 kWh ribose, o generavimo – 783–1287 kWh ribose (žr. 2 pav.). Buvo dienų, kai gaminantys vartotojai į elektros tinklą generuodavo 2–3 kartus daugiau elektros energijos, negu jos sunaudodavo prie linijos prijungti visi vartotojai.



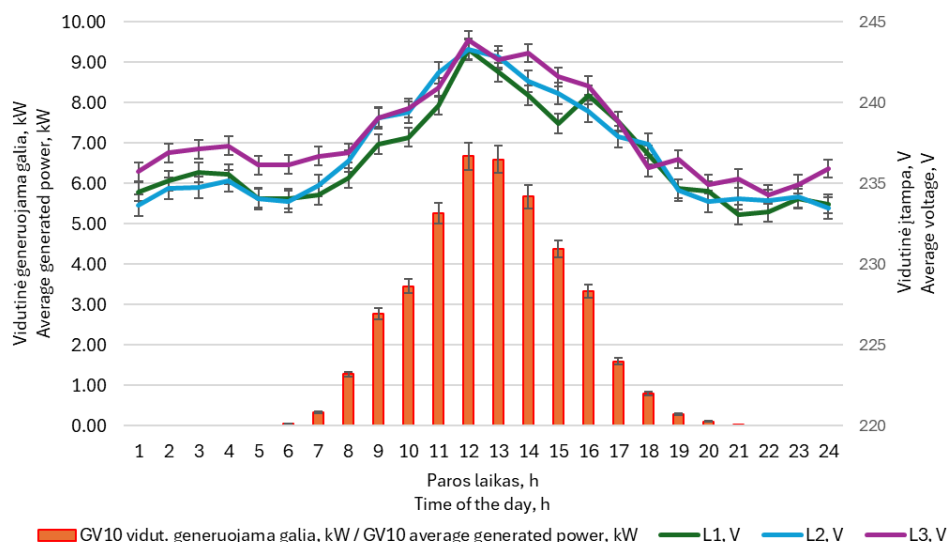
2 pav. Tiriomoje linijoje prijungtų vartotojų apkrovų ir saulės elektrinių generuojamos elektros energijos pokyčiai
Fig. 2. Variation of the loads of consumers connected to the line and the electricity generated by solar power plants

Tiriamos linijos fazinių įtampų pokyčiai buvo tiriami tuo pačiu laikotarpiu (nuo 2025 m. liepos 12 d. iki liepos 18 d.). Šiuo tyrimu buvo siekta nustatyti įtampų pokyčius transformatorinėje naktį (kai gaminantys vartotojai elektros energijos negeneruoja) ir dieną (kai gaminantys vartotojai elektros energiją generuoja). Nakties, ryto ir vakaro laikotarpiais (nuo 20 val. iki 6 val.), kai gaminantys vartotojai elektros energijos negeneruoja, fazinės įtampos transformatorinėje kinta mažame diapazone (nuo 235 iki 236,5 V). Dienos metu (nuo 7 val. iki 19 val.), kai gaminantys į skirstomuosius tinklus generuoja elektros energiją, pastebimas fazinių įtampų augimas nuo $235 \pm 2,6$ V iki $239 \pm 2,1$ V (žr. 3 pav.). Didžiausias fazinių įtampų padidėjimas pastebimas esant didžiausiai gaminančių vartotojų generuojamai galiai, kuri pasireiškia 12 val. ir siekia 180 ± 14 kW. Analizuojant žemos įtampos fazinių įtampų simetriją transformatorinėje, pastebėta, kad ji kinta 235–242 V ribose ir beveik nepriklauso nuo saulės elektrinės darbo grafiko. Tikėtina, kad tokią fazinių įtampų asimetriją sukelia netolygiai pasiskirstę prie TP prijungtų vartotojų apkrovos atskirose fazėse.



3 pav. Tiriomoje linijoje prijungtų gaminančių vartotojų paros generuojamos elektros energijos ir įtampos pokyčiai
Fig. 3. Variations of daily electricity generated and phase voltages of the electricity prosumers connected to the line

Fazinių įtampų pokyčiai linijoje prijungto gaminančio vartotojo (GV10) įvade yra susiję su saulės elektrinės darbo laiku. Šio gaminančio vartotojo leistina generuoti galia – 10 kW, o leistina naudoti galia yra 15 kW. Fazinės įtampos šio vartotojo įvade yra ženkliai mažesnės nuo 20 val. iki 6 val., kai gaminantis vartotojas netiekia į elektros tinklą elektros energijos – nuo 233 V iki 239 V ir padidėja iki 246 V, kai šio gaminančio vartotojo generuojama galia pasiekia $8,8 \pm 2,4$ kW.



4 pav. Pasirinkto gaminančio vartotojo paros generuojamos elektros energijos ir įtampų pokyčiai
Fig. 4. Variations of daily electricity generated and phase voltages of the electricity prosumer

Fazinių įtampų asimetrija šio gaminančio vartotojo įvade tiriamuoju laikotarpiu buvo maža (228–248 V ribose) ir beveik nepriklausė nuo saulės elektrinės darbo grafiko.

Išvados

1. Gaminantys vartotojai tiriamuoju laikotarpiu į operatoriaus tinklus pateikė 6919 kWh, o iš jų gavo apie 3553 kWh elektros energijos. Vadinasi, tiriamuoju laikotarpiu linijoje prijungti gaminantys vartotojai patenkino savuosius ir padengė kitų, prie linijos prijungtų vartotojų, elektros energijos poreikius.

2. Reikšmingiausias fazinių įtampų pokytis transformatorinėje pastebėtas dienos metu, esant didžiausiai gaminančių vartotojų generuojamai galiai. Fazinės įtampos padidėjo nuo $235 \pm 2,6$ V nakties metu iki $239 \pm 2,1$ V vidurdienį.

3. Fazinių įtampų asimetrija transformatorinėje ir gaminančio vartotojo įvade beveik nepriklauso nuo saulės elektrinių darbo grafiko. Ji didesnė transformatorinėje ir siekia 4,05 %, o gaminančio vartotojo įvade – apie 1,6 %.

Literatūra

2. Abdalla, O. H., & Mostafa, A. A. (2019). Technical requirements for connecting solar power plants to electricity networks. In T. Taner (Ed.), *Innovation in energy systems: New technologies for changing paradigms* (pp. 27–50). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88439>
3. Belcher, B., Petry, B., Davis, J., & Hatipoglu, T. (2017). The effects of major solar integration on a 21-bus system: Technology review and PSAT simulations. In *Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2017*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/SECON.2017.7925361>
4. ESO. (2026). Atsinaujinančios energetikos naujienos: pernai fiksuotas rekordinis augimas – ESO prijungė daugiau kaip 53 tūkst. gaminančių vartotojų. 2026 m. sausio 28 d. [Žiūrėta 2026 01 30]. Prieiga per: < <https://www.eso.lt/atsinaujinanacios-energetikos-naujienos-pernai-fiksuotas-rekordinis-augimas-eso-prijunge-daugiau-kaip-53-tukst.-gaminanciu-vartotoju/4894>>.
4. International Renewable Energy Agency. (2025, March 26). *Renewable capacity highlights*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA_DAT_RE_Capacity_Highlights_2025.pdf
5. International Energy Forum. (2024, May 21). *The remarkable rise of solar power*. <https://www.ief.org/news/the-remarkable-rise-of-solar-power>
6. Lietuvos energetikos agentūra. (2026, January 6). *Nacionalinė elektros energijos generacija Lietuvoje: 2025 m. gruodžio mėn.* https://www.ena.lt/uploads/NEL-generacija/2025/NEL-2025-12-generacija_2026-01-06.pdf
7. Sterling, J., McLaren, J., Taylor, M., & Cory, K. (2013). *Treatment of solar generation in electric utility resource planning* (NREL/TP-6A20-60047). National Renewable Energy Laboratory. Prieiga per internetą: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60047.pdf>.

IMPACT OF SOLAR POWER PLANTS ON THE POWER QUALITY OF THE DISTRIBUTION NETWORK

Abstract

The development of the solar energy network provides an opportunity for photovoltaic energy to connect to national distribution networks. This important technology optimizes the balance of electricity supply, increases the cost-effectiveness of the photovoltaic system, reduces operating costs and provides added value to the consumer and the distribution network operator. The increasing share of renewable energy that needs to be integrated into electricity systems causes engineering challenges, such as changes in electricity quality, capacity limitations, safety measures, synchronization processes, system inertia, etc. In this work, the quality of electricity in a 0.4 kV distribution network with integrated solar power plants was studied. A 409 m long 0.4 kV overhead line was selected for the study, to which 35 electricity consumers and 8 solar power plants are connected. The permissible usable power of the electricity consumers connected to the line is 305 kW, and the permissible generating power of the solar power plants is 72 kW. This study determined voltage deviations at the input of consumers as the loads on the line and the power generated by solar power plants varied. The paper presents an analysis of changes in the consumption and generation of electricity and voltage deviations of consumers connected to the line under study for one week. During the week, generating consumers supplied 6919 kWh to the operator's networks, of which they consumed about 3553 kWh of electricity. Voltage deviations at the transformer station during the study period were small. The most significant change in phase voltages was observed during the day, when the power generated by generating consumers was at its highest. The asymmetry of phase voltages at the input of the transformer station and the generating consumer is almost independent of the solar power plant's operating schedule.

Keywords: solar power plant, electricity distribution network, electricity quality.