QAYTA TIKLANADIGAN ENERGIYA MANBALARINING 0,4 KV KUCHLANISHLI TAQSIMLOVCHI TARMOQLARGA TA'SIRINI TADQIQ ETISH

To'yboyev O.U.
Buxoro davlat texnika universiteti
Elektr va energetika muhandisligi kafedrasi
https://doi.org/10.5281/zenodo.23177696

Annotatsiya. Maqolada qayta tiklanadigan energiya manbalarini, xususan taqsimlangan quyosh fotoelektr (PV) qurilmalarini 0,4 kV kuchlanishli taqsimlovchi elektr tarmoqlariga integratsiya qilishning tarmoq ish rejimlariga ta'siri o'rganilgan. Kuchlanish profili, aktiv quvvat isrofi, transformator va liniyalarning yuklanishi, teskari quvvat oqimi hamda fazalar nosimmetriyasi asosiy baholash mezonlari sifatida qabul qilingan. Ilmiy adabiyotlar tahlili va namunaviy hisoblash ssenariysi asosida PV generatsiyasi mahalliy iste'molni qoplagan holatda tarmoq toki va I^2R isroflari kamayishi, yuqori penetratsiyada esa ortiqcha kuchlanish va teskari quvvat oqimi yuzaga kelishi mumkinligi ko'rsatilgan. Ishda real obyekt o'lchovi bo'lmagan sonli natijalar alohida ravishda namunaviy modellashtirish ssenariysi sifatida berilgan.

Kalit so'zlar: qayta tiklanadigan energiya, quyosh fotoelektr tizimi, 0,4 kV tarmoq, taqsimlangan generatsiya, kuchlanish profili, quvvat isrofi, teskari quvvat oqimi, fazalar nosimmetriyasi.

Аннотация. В статье исследовано влияние интеграции распределённых фотоэлектрических установок в распределительные сети напряжением 0,4 кВ. В качестве основных показателей рассмотрены профиль напряжения, потери активной мощности, загрузка трансформатора и линий, обратный поток мощности и несимметрия фаз. Анализ научных источников показывает, что умеренная фотоэлектрическая генерация может снизить ток и потери I^2R, тогда как высокий уровень проникновения способен вызвать повышение напряжения и обратные перетоки мощности. Численные данные, не полученные на реальном объекте, обозначены как иллюстративный сценарий моделирования.

Ключевые слова: возобновляемая энергия, фотоэлектрическая система, сеть 0,4 кВ, распределённая генерация, профиль напряжения, потери мощности.

Abstract. This paper investigates the impact of distributed photovoltaic generation on 0.4 kV low-voltage distribution networks. Voltage profile, active power losses, transformer and feeder loading, reverse power flow, and phase unbalance are considered as key indicators. A review of published research shows that moderate PV penetration can reduce feeder current and I^2R losses, whereas high penetration may cause voltage rise and reverse power flow. Numerical values not obtained from a real field installation are explicitly presented as an illustrative modelling scenario.

Keywords: renewable energy, photovoltaic system, 0.4 kV network, distributed generation, voltage profile, power losses, reverse power flow.

1. KIRISH

Qayta tiklanadigan energiya manbalarining elektr energetika tizimiga jadal kirib kelishi taqsimlovchi tarmoqlarning an'anaviy ishlash tamoyillarini o'zgartirmoqda. Ayniqsa, turar joy, ma'muriy va ishlab chiqarish obyektlarida kichik quvvatli tom usti quyosh fotoelektr qurilmalarining o'rnatilishi elektr energiyasini iste'mol nuqtasiga yaqin joyda ishlab chiqarish imkonini beradi. Bunda ilgari transformator podstansiyasidan iste'molchiga yo'nalgan bir tomonlama quvvat oqimi ayrim soatlarda ikki tomonlama rejimga o'tadi.

0,4 kV radial tarmoqlarda PV qurilmasining quvvati va ulanish nuqtasi kuchlanish og'ishi hamda liniya quvvat isrofiga sezilarli ta'sir qilishi oldingi tadqiqotlarda ko'rsatilgan [1]. 2025-yilda e'lon qilingan tahlilda turli PV penetratsiya darajalari bo'yicha kuchlanish, tarmoq elementlari yuklanishi va quvvat isroflari baholangan; yuqori penetratsiyada kuchlanish ortishi va isrofning qayta oshishi mumkinligi aniqlangan [2]. 0,4 kV liniyalarda ko'p sonli maishiy PV qurilmalari sababli kuchlanish ortishi 2026-yildagi alohida tadqiqotda ham asosiy muammo sifatida ko'rib chiqilgan [3].

O'zbekiston sharoitida 6–10/0,4 kV tarmoqlardagi fazalar nosimmetriyasi elektr energiyasi sifatining yomonlashishi va qo'shimcha isroflarga sabab bo'lishi aniqlangan [4]. So'nggi mahalliy ishlarda 0,4 kV tarmoqlarning simmetrik va nosimmetrik rejimlari DIgSILENT PowerFactory yordamida modellashtirilib, fazalar bo'yicha notekis yuklanishning kuchlanish va isroflarga ta'siri baholangan [5]. Bu holat bir fazali PV invertorlari keng qo'llanadigan tarmoqlar uchun ayniqsa dolzarbdir.

2. TADQIQOT MAQSADI VA USULLARI

Tadqiqotning maqsadi - 0,4 kV radial taqsimlovchi tarmoqda PV generatsiya darajasining kuchlanish profili, aktiv quvvat isrofi va tarmoq yuklanishiga ta'sirini nazariy jihatdan tahlil qilish hamda keyingi ETAP, DIgSILENT PowerFactory yoki MATLAB/Simulink modellashtirish ishlari uchun hisoblash metodikasini shakllantirish.

Tarmoq tugunidagi aktiv quvvat balansi quyidagi soddalashtirilgan ifoda bilan tavsiflanadi:

$$P_i = P_{i,yuk} - P_{i,PV}$$

bu yerda $P_{i,yuk}$ - i-tugundagi aktiv yuklama; $P_{i,PV}$ - shu tugundagi PV generatsiya quvvati. Agar $P_{i,PV}$ iste'moldan katta bo'lsa, tugundan yuqori kuchlanish tomonga aktiv quvvat uzatilishi mumkin.

Radial liniyaning bir uchastkasidagi kuchlanish o'zgarishi soddalashtirilgan ko'rinishda:

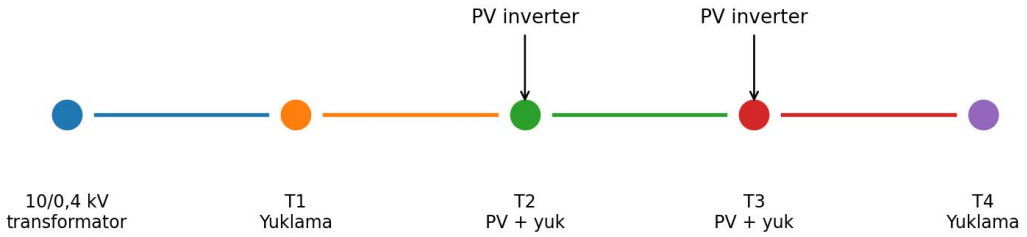
$$\Delta U \approx (R \cdot P + X \cdot Q) / U$$

ifoda orqali baholanadi. Past kuchlanishli tarmoqlarda R/X nisbati nisbatan katta bo'lgani sababli aktiv quvvat oqimining o'zgarishi kuchlanish amplitudasiga kuchli ta'sir ko'rsatadi [6]. Liniyadagi aktiv quvvat isrofi esa:

$$\Delta P = 3I^2R$$

formula bilan baholanadi. Demak, PV generatsiyasi mahalliy yuklamaning bir qismini qoplab, liniya tokini kamaytirsa, aktiv quvvat isrofi kvadratik bog'lanish asosida kamayadi.

Biroq PV ishlab chiqarishi mahalliy yukdan sezilarli ortsa, teskari oqim sabab liniya toki yana ortishi va kuchlanish yuqorilashi mumkin.



1-rasm. 0,4 kV radial taqsimlovchi tarmoqning soddalashtirilgan hisoblash sxemasi

3. HISOBLASH SSENARIYSI

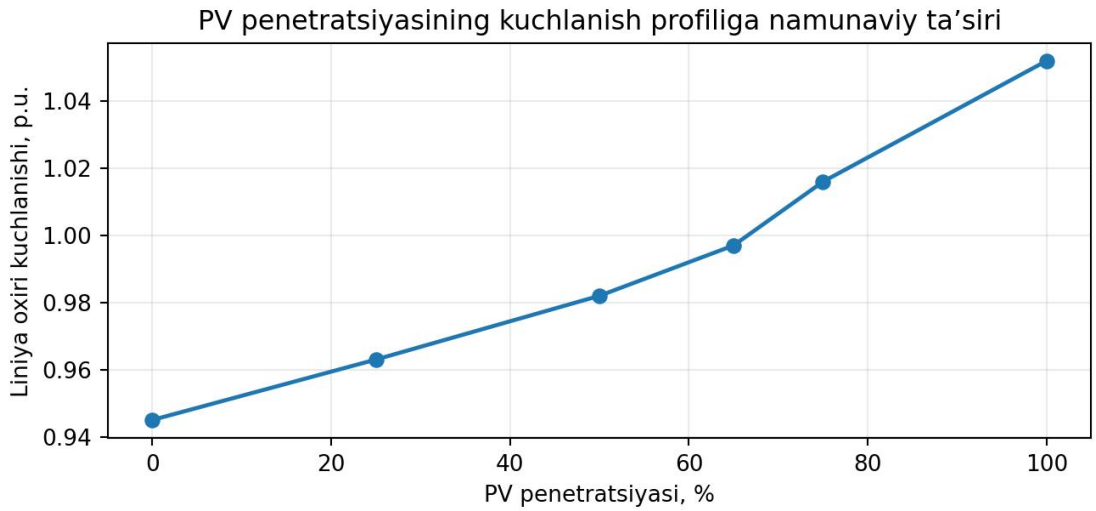
Tahlil uchun PV penetratsiyasi 0, 25, 50, 65, 75 va 100% bo‘lgan oltita shartli rejim qabul qilindi. Penetratsiya darajasi PV generatsiyasining tanlangan bazaviy yuklama quvvatiga nisbati sifatida qaraladi. Quyidagi qiymatlar real obyekt o‘lchovi yoki tajriba natijasi emas. Ular adabiyotlarda kuzatilgan umumiy tendensiyani ko‘rsatish va keyingi real modellashtirish uchun metodik namuna yaratish maqsadida shakllantirilgan.

PV, %	Uoxiri, p.u.	ΔP, %	Liniya yuklanishi, %
0	0.945	7.4	100
25	0.963	5.8	78
50	0.982	4.3	59
65	0.997	3.6	48
75	1.016	3.8	42
100	1.052	5.0	35

1-jadval. PV penetratsiyasi bo‘yicha namunaviy modellashtirish ssenariysi

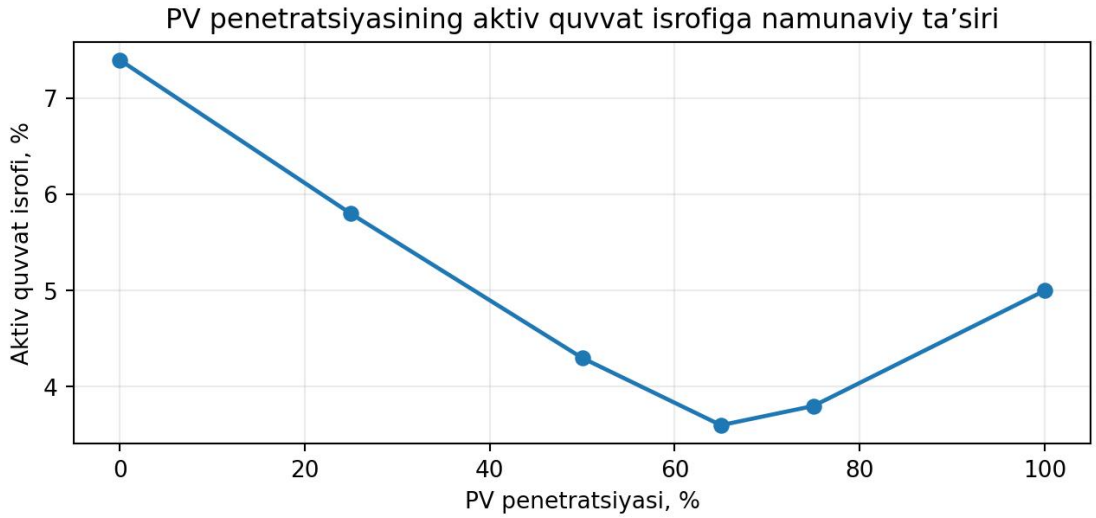
4. NATIJALAR VA MUHOKAMA

Namuna ssenariysida PV ulushi 0 dan 65% gacha oshirilganda liniya oxiridagi kuchlanish nominal qiymatga yaqinlashadi va aktiv quvvat isrofi kamayadi. Bu holat PV qurilmasi iste’mol nuqtasiga yaqin joyda quvvat ishlab chiqargani uchun transformator va magistral liniya orqali uzatiladigan aktiv quvvatning kamayishi bilan izohlanadi. Mazkur tendensiya real tarmoq parametrlaridan foydalangan NEPLAN tadqiqotidagi umumiy xulosalar bilan mos keladi [2]. Biroq 65% qiymat universal texnik chegara emas: haqiqiy hosting capacity liniya uzunligi, kesimi, R/X nisbati, transformator quvvati, yuklama grafigi va PV joylashuviga bog‘liq.



2-rasm. PV penetratsiyasi va liniya oxiri kuchlanishi (namunaviy ssenariy)

PV ulushi yanada oshirilganda, ayniqsa kunduzgi yuklama kichik va quyosh generatsiyasi maksimal bo‘lgan vaqtda, quvvat oqimi yo‘nalishi o‘zgarishi mumkin. Bunda liniya oxiridagi kuchlanish transformator shinasidagi kuchlanishdan yuqori bo‘lib qolishi ehtimoli mavjud. Zamonaviy tadqiqotlarda bunday overvoltage holati PV qurilmalarining himoya orqali tarmoqdan uzilishigacha olib kelishi mumkinligi ko‘rsatilgan [3,6].



3-rasm. PV penetratsiyasi va aktiv quvvat isrofi (namunaviy ssenariy)

Aktiv quvvat isrofi grafigida o‘rta penetratsiya diapazonida kamayish, yuqori penetratsiyada esa qayta o‘sish tendensiyasi ko‘rsatilgan. Buning fizik sababi liniya toki modulining dastlab kamayishi, teskari quvvat oqimi kuchaygach esa yana ortishi bilan bog‘liq. Shu sababli PV tizimining samarali integratsiyasi faqat o‘rnatilgan quvvatni maksimal oshirish emas, balki tarmoqning qabul qilish qobiliyatini aniqlash masalasidir.

Uch fazali to‘rt simli 0,4 kV tarmoqlarda yana bir muhim omil - fazalar nosimmetriyasidir. Bir fazali PV invertorlari fazalar bo‘yicha notekis taqsimlanganda kuchlanish nosimmetriyasi, neytral toki va qo‘shimcha isroflar ortishi mumkin [7]. Farg‘ona hududidagi 10(6)/0,4 kV transformatorlarda real o‘lchovlarga asoslangan tadqiqotda notekis

faza yuklanishi va bir fazali quyosh invertorlari kuchlanish nosimmetriyasining sabablaridan biri sifatida ko‘rsatilgan [8].

Shuning uchun amaliy loyihada quyidagi ketma-ketlik tavsiya etiladi: sutkalik minimal va maksimal yuklama rejimlarini aniqlash; kabel yoki havo liniyalarining R va X parametrlarini kiritish; transformatorning nominal quvvati va qisqa tutashuv parametrlarini hisobga olish; PV ishlab chiqarish profilini shakllantirish; fazalar bo‘yicha yuk va PV taqsimotini tekshirish; load-flow hisoblarini turli penetratsiya darajalari uchun bajarish; kuchlanish, teskari oqim, termik yuklanish va isrof mezonlari bo‘yicha ruxsat etiladigan PV quvvatini aniqlash.

5. AMALIY AHAMIYATI

Taklif etilgan yondashuv 0,4 kV tarmoqqa yangi quyosh fotoelektr qurilmalarini ulashdan oldin texnik shartlarni asoslash, mavjud transformator va liniyalarning qo‘shimcha generatsiyani qabul qilish imkoniyatini baholash hamda elektr energiyasi isroflarini kamaytirish choralarini tanlashda qo‘llanishi mumkin. O‘zbekistonning mavjud past kuchlanishli tarmoqlarida fazalar nosimmetriyasi va kuchlanish sifati masalalari avvalgi tadqiqotlarda qayd etilganligi sababli [4,5], PV integratsiyasi tahlilida uch fazali nosimmetrik modeldan foydalanish maqsadga muvofiq.

Keyingi bosqichda maqola metodikasini real 10/0,4 kV transformator podstansiyasi va uning chiqish fideriga tatbiq etish, AMI/ASKUE ma’lumotlari yoki portativ analizator o‘lchovlari asosida sutkalik yuklama profilini olish va modellashtirish natijalarini o‘lchov bilan verifikatsiya qilish ilmiy natijaning ishonchliligini oshiradi.

XULOSA

Qayta tiklanadigan energiya manbalari, ayniqsa quyosh fotoelektr qurilmalarining 0,4 kV taqsimlovchi tarmoqlarga ulanishi tarmoq rejimiga ikki tomonlama ta’sir ko‘rsatadi. Maqbul quvvat va ulanish nuqtasi tanlanganda mahalliy generatsiya liniya tokini, transformator yuklanishini va aktiv quvvat isroflarini kamaytirishi hamda kuchlanish profilini yaxshilashi mumkin. PV generatsiyasi mahalliy iste’moldan yuqori bo‘lgan rejimlarda esa teskari quvvat oqimi va ortiqcha kuchlanish xavfi yuzaga keladi.

0,4 kV tarmoqning ruxsat etiladigan PV quvvatini bitta umumiy foiz bilan belgilash to‘g‘ri emas. Hosting capacity har bir fider uchun uning elektr parametrlaridan, yuklama va generatsiya grafiklaridan, fazalar bo‘yicha taqsimlanishdan hamda transformator rejimidan kelib chiqib alohida aniqlanishi kerak. O‘zbekiston sharoitida bir fazali invertorlarning fazalar bo‘yicha muvozanatli taqsimlanishi ham alohida nazorat qilinishi zarur.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Shandarova E.B., Makarova A.F., Shvartsman I.B. Effect of Distributed Photovoltaic Generation on the Voltage Magnitude in a Self-Contained Power Supply System. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 127, 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/127/1/012005.
2. Rajab Z., Khalil A., Taher A., Mohamed F. Impact assessment of different PV generation levels on low-voltage distribution networks. Computers & Electrical Engineering, 2025, 123, 110233. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2025.110233.

3. Petrauskas G., Svinkunas G. Voltage Rise Mitigation in 0.4 kV Power Distribution Lines Powered by Multiple Residential Photovoltaic Solar Plants. Energies, 2026, 19(1), 35. DOI: 10.3390/en19010035.
4. Kholiddinov I.K. Electric Power Quality Analysis 6-10/0.4 kV Distribution Networks. Energy and Power Engineering, 2016, 8, 263-269. DOI: 10.4236/epe.2016.86025.
5. Khudayarov M.B., Abdukhalimov J.A., Oltiboyev D.S. Modeling and Analysis of Various Operating Modes of 0,4 kV Low Voltage Electrical Networks. Problems of Energy and Sources Saving, 2026, 1(1), 58-68.
6. Distributed PV auxiliary voltage control strategy in low voltage distribution network based on small AC signals. Science and Technology for Energy Transition, 2025. DOI: 10.2516/stet/2025011.
7. Nour A.M.M. et al. Voltage violation in four-wire distribution networks integrated with rooftop PV systems. IET Renewable Power Generation, 2020. DOI: 10.1049/iet-rpg.2020.0174.
8. Ugli R.M.F. et al. Impact of Voltage Unbalance on Distribution Transformer Efficiency under Asymmetric and PV-Integrated Loads. 14th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2025, pp. 810-815. DOI: 10.1109/ICRERA66237.2025.11283714.
9. Energy loss calculation and voltage profile improvement for the rehabilitation of 0.4 kV low voltage distribution network (LVDN). Measurement: Energy, 2024, 4, 100029. DOI: 10.1016/j.meaene.2024.100029.
10. Bobojanov M.K., Omorov T.T., Usmanov E.G. Mathematical modeling of low-voltage distribution electrical networks. Problems of Energy and Sources Saving, 2026, 4(4), 52-63.