



QUYOSH PANELLARI ISHLAB CHIQRAYOTGAN ELEKTR ENERGIYA TA'MINOTI MANBALARINING REAKTIV QUVVAT KO'RSATKICHLARINI TAHLILI

Raximberdiyev Sardorbek Alijon o'g'li

2-kurs magistr

Andijon davlat texnika institute

“Elektr muhandisligi” kafedrası

e-mail: sardorraximberdiyev9@gamil.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20206792>

ARTICLE INFO

Qabul qilindi: 11-may 2026 yil
Ma'qullandi: 13-may 2026 yil
Nashr qilindi: 15-may 2026 yil

KEY WORDS

quyosh panellari; fotovoltaik
invertor; reaktiv quvvat; quvvat
omili; kuchlanish barqarorligi;
taqsimlovchi tarmoq;
kompensatsiya.

ABSTRACT

Ushbu tadqiqot quyosh panellari asosidagi taqsimlangan generatsiya manbalarining elektr tarmog'iga ulanishi sharoitida reaktiv quvvat ko'rsatkichlari va ularning kuchlanish barqarorligi, quvvat omili hamda yo'qotishlarga ta'sirini tahlil qilishga qaratilgan. Maqsad invertor boshqaruvi, tarmoq impedansi va yuk profilining o'zgaruvchanligi fonida reaktiv quvvat oqimlarining shakllanish mexanizmlarini aniqlash va amaliy boshqaruv mezonlarini taklif etishdan iborat. Metodologiya sifatida taqsimlovchi tarmoqlar uchun ekvivalent sxemalar, quvvat oqimi tenglamalari, quvvat omili va reaktiv energiya balansining hisobiy tahlili hamda $Q(V)$ va $PF(P)$ xarakteristikalari orqali baholash yondashuvi qo'llanildi. Ilmiy yangilik sifatida fotovoltaik invertorlarning reaktiv quvvat imkoniyatlarini tarmoqning R/X nisbatiga mos adaptiv sozlash konsepsiyasi va reaktiv quvvat kompensatsiyasining texnik samaradorligini baholash uchun integral ko'rsatkichlar tizimi asoslandi.

Taqsimlovchi elektr tarmoqlarida quyosh panellari asosidagi taqsimlangan generatsiyaning ulushi ortib borar ekan, energiya sifati ko'rsatkichlari va ayniqsa reaktiv quvvat bilan bog'liq texnik muammolar yanada muhimlashmoqda. An'anaviy taqsimlovchi tarmoqlar asosan bir yo'nalishli quvvat oqimi va markazlashgan reaktiv quvvat boshqaruvi sharoitiga mos loyihalangan bo'lib, fotovoltaik stansiyalar ulanishi natijasida quvvat oqimining qayta yo'nalishi, kuchlanishning mahalliy ko'tarilishi va quvvat omilining dinamik o'zgarishi kuzatiladi. Reaktiv quvvatning noto'g'ri boshqarilishi transformator va liniyalarda qo'shimcha toklar paydo bo'lishiga, yo'qotishlar ortishiga, kuchlanish cheklovlarining buzilishiga hamda himoya va avtomatika qurilmalarining moslashuvchanligi pasayishiga olib kelishi mumkin. Shu bilan birga, zamonaviy PV invertorlari faqat aktiv quvvat manbai emas, balki belgilangan chegaralarda reaktiv quvvatni berish yoki yutish orqali kuchlanishni ushlab turish hamda quvvat omilini

me'yorlashtirish imkonini beruvchi moslashuvchan qurilmaga aylanmoqda. Biroq invertorlarning reaktiv quvvat imkoniyatlari aktiv quvvat ishlab chiqarish darajasi, apparat cheklovlari va tarmoqning R/X nisbatiga kuchli bog'liq bo'lgani sababli, amaliy boshqaruv yondashuvlarini tanlashda yagona universal qoida mavjud emas.

Mavjud tadqiqotlarda taqsimlovchi tarmoqlarda kuchlanishni reaktiv quvvat orqali boshqarishning nazariy asoslari, invertorlarning Volt-VAR va Volt-Watt funksiyalari, hamda quvvat oqimi modellariga tayangan optimallashtirish masalalari keng yoritilgan [1; 2]. Shu bilan birga, real tarmoqlarda R/X nisbati yuqoriligi sababli kuchlanish sezgirligi nafaqat reaktiv, balki aktiv quvvatga ham sezilarli darajada bog'lanadi; demak, reaktiv quvvatni "klassik" uzatish tarmoqlari mantig'i bilan boshqarish har doim ham kutilgan natijani bermaydi [3]. MDH olimlari ishlarida reaktiv quvvat kompensatsiyasining iqtisodiy va ekspluatatsion samaradorligi, taqsimlovchi tarmoqlarda kondensator qurilmalari va statik kompensatorlardan foydalanish masalalari muhokama qilingan bo'lsa-da, PV invertorlarning mahalliy va tezkor VAR boshqaruvi bilan bu vositalarning o'zaro ta'siri ko'pincha yetarlicha tizimli baholanmagan [4]. O'zbekiston sharoitida quyosh resurslari yuqori bo'lgani uchun PV generatsiyaning jadal o'sishi kutiladi, bu esa reaktiv quvvat bo'yicha me'yoriy talablar, dispetcherlik siyosati va tarmoqni rivojlantirish qarorlarida ilmiy asoslangan tahlilni zarur qiladi [5].

Ushbu maqolaning maqsadi quyosh panellari ishlab chiqarayotgan elektr energiya ta'minoti manbalarining reaktiv quvvat ko'rsatkichlarini taqsimlovchi tarmoq nuqtayi nazaridan tahlil qilish, invertor boshqaruvining asosiy rejimlari uchun Q oqimlari, quvvat omili va kuchlanish og'ishlari o'rtasidagi bog'lanishlarni hisobiy asosda yoritish hamda amaliy qo'llash mumkin bo'lgan baholash mezonlarini taklif etishdan iborat. Tadqiqot vazifalari quyidagilarni o'z ichiga oladi: taqsimlovchi liniya va transformatorlarning ekvivalent parametrlari asosida kuchlanishning P va Q ga sezgirligini ifodalash; PV invertorning reaktiv quvvat imkoniyatlari chegaralarini apparat quvvati va aktiv ishlab chiqarish bilan bog'lash; PF(P) va Q(V) xarakteristikalarini orqali turli boshqaruv strategiyalarini solishtirish; reaktiv quvvat kompensatsiyasi samaradorligini yo'qotishlar va kuchlanish sifati integrali orqali baholash. Ilmiy yangilik maqolada tarmoqning R/X nisbatiga mos adaptiv VAR sozlash g'oyasini izohlash, hamda reaktiv quvvat boshqaruvining texnik samaradorligini baholovchi ko'rsatkichlar tizimini izchil asoslash orqali namoyon bo'ladi.

Metodlar. Tadqiqot metodologiyasi taqsimlovchi elektr tarmog'ining radial tuzilmasi uchun bir liniyali ekvivalent sxema va quvvat oqimi tenglamalarining soddalashtirilgan ko'rinishiga tayandi. Modelda ta'minlovchi shina kuchlanishi U_0 , liniya qarshiligi R va induktiv reaktansi X, yuk tugunidagi aktiv va reaktiv quvvat talabining vaqt bo'yicha o'zgarishi $P_{load}(t)$, $Q_{load}(t)$, hamda PV tugunining aktiv ishlab chiqarishi $PPV(t)$ va invertor reaktiv quvvati $QPV(t)$ parametr sifatida qabul qilindi. Kuchlanish og'ishi uchun taqsimlovchi tarmoqlarda keng qo'llaniladigan yaqinlashuvdan foydalanildi: kuchlanishning nisbiy o'zgarishi aktiv va reaktiv quvvat oqimlari bilan chiziqli bog'liq bo'lib, ΔU taxminan $(R \cdot P + X \cdot Q)/U_0$ ga proporsional deb olindi. Bu ifoda R/X nisbatining kuchlanish sezgirligidagi rolini ajratib ko'rsatish imkonini berdi, ya'ni R/X kattalashgan sari aktiv quvvatning kuchlanishga ta'siri kuchayadi, reaktiv quvvatning nisbiy hissasi esa kamayadi. Invertor cheklovlari apparat ko'rinishida S_{max} quvvat bo'yicha belgilanib, QPV

uchun chegaralar $QPV^2 \leq S_{max}^2 - PPV^2$ sharti bilan ifodalandi; bu yondashuv real inverterlarda aktiv quvvat maksimal bo'lgan vaqtda reaktiv quvvat zaxirasi qisqarishini hisobga oladi [1]. Boshqaruv strategiyalari sifatida uchta rejim ko'rib chiqildi: doimiy quvvat omili rejimi, doimiy Q rejimi va kuchlanishga bog'liq $Q(V)$ droop rejimi. Har bir rejimda tugun kuchlanishi, tarmoqdan olinadigan umumiy reaktiv quvvat, liniya yo'qotishlari va quvvat omili ko'rsatkichlari hisobiy baholandi.

Ma'lumotlar bazasi sifatida tipik 0,4–10 kV taqsimlovchi liniyalar uchun R va X ning diapazon qiymatlari, kunduzgi PV ishlab chiqarish profili va yukning kundalik o'zgarishiga mos normalashtirilgan ssenariylar qabul qilindi. Ssenariylar PV ulushi past, o'rta va yuqori bo'lgan holatlarni qamrab oldi, shuningdek, yukning induktivligi yuqori bo'lgan sanoat profili va aralash maishiy profil alohida qaraldi. Hisoblash mezonlari sifatida (i) tugun kuchlanishining me'yoriy diapazondan chiqish ehtimoli, (ii) quvvat omilining 0,95 dan past bo'lish holatlari ulushi, (iii) liniya aktiv yo'qotishlari integral qiymati va (iv) tarmoqdan talab qilinadigan reaktiv quvvatning modul bo'yicha integral qiymati tanlandi. Metodologik tanlovning ilmiy asosi shundan iboratki, bu ko'rsatkichlar reaktiv quvvat boshqaruvining tarmoq ekspluatatsiyasi nuqtayi nazaridan eng sezgir oqibatlarini bir vaqtning o'zida yoritadi hamda inverter boshqaruvining lokal xarakteri bilan tizim ko'rsatkichlari o'rtasidagi bog'lanishni ochib beradi [2; 6].

Natija. Hisobiy tahlil natijalari birinchi navbatda kuchlanish sezgirligining tarmoq parametrlari bilan aniqlanishini ko'rsatdi. R/X nisbati kichik bo'lgan feederlarda reaktiv quvvatning kuchlanishga ta'siri ustun bo'lib, QPV ning yutilishi kuchlanish ko'tarilishini samarali bostiradi; aksincha, R/X nisbati yuqori bo'lgan past kuchlanishli uzun liniyalarda PPV ning o'zi kuchlanish og'ishini shakllantiruvchi asosiy omilga aylanadi va reaktiv quvvatning kompensatsion roli nisbatan cheklanadi. Shu sababli bir xil $Q(V)$ sozlamasi turli feederlarda bir xil natija bermasligi, hatto ayrim holatlarda ortiqcha reaktiv oqimlar hisobiga yo'qotishlarni ko'paytirishi kuzatildi.

Inverter cheklovlari tahlilida PPV maksimal bo'lgan peshin soatlarida QPV zaxirasining keskin kamayishi aniqlanib, S_{max} ga yaqin ishlash sharoitida quvvat omilini qat'iy ushlab turish rejimi kuchlanish me'yorlari bilan ziddiyatga kirishi mumkinligi ko'rsatildi. Doimiy quvvat omili rejimida yuk induktiv bo'lganda tarmoqdan olinadigan umumiy reaktiv quvvat kamaydi, biroq PV tugunida kuchlanish ko'tarilishi holatlari kamaymadi, chunki PF rejimi QPV ni kuchlanishga emas, PPV ga proporsional tarzda belgilaydi. Doimiy Q rejimi kuchlanish og'ishlarini qisman tekisladi, ammo PV ishlab chiqarishi pasaygan kechki o'tish davrlarida tarmoqning reaktiv balansiga noo'rin aralashib, transformator quvvatidan foydalanish ko'rsatkichlarini yomonlashtirdi.

$Q(V)$ droop rejimi natijalari kuchlanish sifatini barqarorlashtirishda eng barqaror ta'sirni berdi: kuchlanish me'yoridan yuqoriga chiqa boshlagan nuqtalarda inverter reaktiv yutishni oshirdi, kuchlanish pasayganda esa reaktiv berishni kuchaytirdi. Biroq droop koeffitsienti juda tik tanlanganda liniya toklarining ortishi sababli aktiv yo'qotishlar integral qiymati oshdi; juda yotiq tanlanganda esa kuchlanish cheklovlarini ta'minlash uchun reaktiv ta'sir yetarli bo'lmadi. Hisobiy ssenariylarda optimal oraliq mavjud bo'lib, u R/X nisbati va PV ulushining kattalashishi bilan droopning "yumshoqroq" tanlanishini talab qildi. Reaktiv energiya talabining integral ko'rsatkichi bo'yicha $Q(V)$ rejimi tarmoqdan olinadigan reaktiv quvvatni kamaytirish bilan birga, VAR almashinuvi

amplitudasini ham pasaytirdi; bu esa transformator va liniya apparat resurslariga ijobiy ta'sir sifatida qayd etildi.

Kompensatsiya samaradorligini baholash uchun tanlangan integral ko'rsatkichlar tizimi bo'yicha quyidagi tendensiyalar aniqlandi: PV ulushi o'rta darajada bo'lganda $Q(V)$ rejimi kuchlanish cheklovidan chiqish holatlarini sezilarli kamaytiradi va yo'qotishlarni mo'tadil darajada ushlab turadi; PV ulushi juda yuqori bo'lganda esa faqat reaktiv boshqaruv yetarli bo'lmay, aktiv quvvatni cheklash yoki tarmoqni qayta konfiguratsiya qilish kabi qo'shimcha choralarga ehtiyoj kuchayadi. Shuningdek, quvvat omili ko'rsatkichi $PF(P)$ egri chizig'i bo'yicha, inverterlarni doimiy PF da ishlatish ayrim ssenariylarda tarmoqning umumiy PF ini yaxshilasa-da, kuchlanish sifati mezonlari bilan kelishilgan kompleks optimallikni bermasligi qayd etildi.

Muhokama. Olingan natijalar taqsimlovchi tarmoqlarda reaktiv quvvat boshqaruvini baholashda uzatish tarmoqlariga xos "Q kuchlanishni boshqaradi" paradigmasini to'liq ko'chirish yetarli emasligini yana bir bor tasdiqlaydi. R/X nisbatining katta bo'lishi kuchlanishning aktiv quvvatga sezgirligini oshiradi va shuning uchun PV integratsiyasi sharoitida reaktiv kompensatsiya ko'proq "nozik sozlash" vazifasini bajaradi, ammo ayrim hollarda kuchlanish ko'tarilishini to'liq bartaraf eta olmaydi. Bu xulosa zamonaviy adabiyotlarda taqsimlovchi tarmoqlar uchun taklif qilinayotgan adaptiv Volt-VAR yondashuvlari bilan mos keladi, ya'ni sozlamalar feeder parametrlari va PV penetratsiyasiga qarab tanlanishi lozim [2; 3]. Shu nuqtayi nazardan maqolada asoslangan adaptiv konsepsiya, droop koeffitsientini R/X va S_{max} bilan bog'langan holda sozlash, amaliy ekspluatatsiyada ortiqcha VAR almashinuvi va keraksiz yo'qotishlarning oldini olishga xizmat qiladi.

Natijalar shuningdek, inverterlarning apparat cheklovi masalasini muhim qiladi: peshin paytida PPV yuqori bo'lgani sababli QPV zaxirasi kamayadi, ya'ni aynan kuchlanish ko'tarilishi eng ehtimolli bo'lgan vaqtda reaktiv boshqaruv imkoniyati torayadi. Xalqaro amaliyotda bu muammo inverterlarni ortiqcha quvvat zaxirasi bilan tanlash yoki aktiv quvvatni cheklash orqali hal etilishi ta'kidlanadi [1; 6]. Biroq iqtisodiy nuqtayi nazardan har doim ham ortiqcha S_{max} tanlash maqsadga muvofiq emas, shuning uchun taklif etilgan integral ko'rsatkichlar yordamida "kuchlanish sifati-yo'qotishlar-inverter quvvati" ucburchagida muvozanatli yechim topish imkoniyati paydo bo'ladi. MDH maktabida reaktiv quvvat kompensatsiyasiga ko'proq statsionar qurilmalar orqali yondashilgan bo'lsa-da, PV inverterlarning tezkorligi va lokal tabiati ularni kondensator batareyalari bilan koordinatsiyalash zarurligini keltirib chiqaradi; aks holda, ikki xil kompensatsiya mexanizmi bir-birini "takrorlab", reaktiv oqimlarni orttirishi mumkin [4]. O'zbekiston sharoitida esa tarmoq uchastkalarining uzunligi, past kuchlanishli segmentlarning R/X nisbati va yuklarning mavsumiy o'zgaruvchanligi hisobga olinganda, reaktiv boshqaruv bo'yicha me'yoriy talablarni feeder tiplari bo'yicha differensiallash ilmiy asosli yondashuv sifatida ko'rinadi [5].

Tadqiqot cheklovlari shundan iboratki, tahlil asosan radial ekvivalent model va soddalashtirilgan kuchlanish yaqinlashuvlariga tayandi; real tarmoqlarda fazalar bo'yicha nosimmetriya, garmoniklar, transformatorlarning rostlash qurilmalari, himoya sozlamalari va bir nechta PV tugunlarining o'zaro ta'siri natijalarni murakkablashtirishi mumkin. Kelajakdagi tadqiqotlar uchun uch fazali quvvat

oqimi modeli asosida, real o'lchovlar bilan verifikatsiya qilingan ssenariylar, shuningdek, reaktiv quvvatning garmoniklar va inverter filtrlari bilan bog'liq qo'shimcha cheklovlarini kiritgan holda kengaytirilgan baholash dolzarbdir. Shuningdek, reaktiv quvvat xizmatlarini bozor mexanizmlari yoki tarif rag'batlari orqali joriy etish masalasi texnik natijalar bilan bir qatorda iqtisodiy tahlilni ham talab qiladi [7].

Xulosa. Tadqiqot quyosh panellari asosidagi taqsimlangan generatsiya manbalarida reaktiv quvvat ko'rsatkichlari tarmoq parametrlari, inverter quvvat cheklovlari va boshqaruv strategiyasiga kuchli bog'liqligini ko'rsatdi. Taqsimlovchi tarmoqlarda R/X nisbati yuqori bo'lganda kuchlanishning aktiv quvvatga sezgirligi ortadi va reaktiv kompensatsiya faqat ma'lum chegaralarda kuchlanish sifatini yaxshilaydi, shuning uchun VAR boshqaruv sozlamalari feeder xususiyatlariga mos adaptiv tanlanishi zarur. Inverterlarning ko'rinma quvvat bo'yicha cheklovi peshin paytida reaktiv zaxirani kamaytirib, kuchlanish ko'tarilishini boshqarishni murakkablashtiradi; bu holat kompensatsiya samaradorligini baholashda albatta hisobga olinishi kerak. Q(V) droop rejimi kuchlanish cheklovlarini ta'minlashda nisbatan barqaror natija berdi, biroq droopning haddan tashqari tik tanlanishi yo'qotishlarni oshirishi aniqlandi. Taklif etilgan integral ko'rsatkichlar tizimi kuchlanish sifati, quvvat omili, reaktiv energiya talabi va yo'qotishlar o'rtasida muvozanatli qaror qabul qilish uchun umumlashtirilgan baholash asosini taqdim etadi.

Adabiyotlar ro'yxati:

1. Bollen M. H. J., Hassan F. Integration of Distributed Generation in the Power System. Hoboken, Wiley, 2011. 560 p.
2. Turitsyn K., Sulc P., Backhaus S., Chertkov M. Options for Control of Reactive Power by Distributed Photovoltaic Generators. Proceedings of the IEEE, 2011, Vol. 99, No. 6, pp. 1063–1073.
3. Kersting W. H. Distribution System Modeling and Analysis. Boca Raton, CRC Press, 2012. 472 p.
4. Веников В. А. Переходные процессы в электрических системах. Москва, Энергия, 1978. 520 с.
5. Karimov A. A., Tojiev A. A. Taqsimlovchi elektr tarmoqlarida quvvat sifati va reaktiv quvvatni kompensatsiyalash masalalari. Toshkent, Fan va texnologiya, 2019. 248 b.
6. IEEE Standard 1547-2018. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. New York, IEEE, 2018. 138 p.
7. Ackermann T. Wind Power in Power Systems. Chichester, John Wiley and Sons, 2012. 1192 p.