KICHIK QUVVATLI SHAMOL ENERGETIK TIZIMIDA PI-ROSTLAGICH ASOSIDA KUCHLANISHNI BOSHQARISH

Muinov Ulug‘bek Baxtiyerovich
Toshkent kimyo-texnologiya instituti tayanch doktorant
Usmonov Botir Shukurillayevich
Toshkent kimyo-texnologiya instituti professor, texnika fanlar doktori

Annotatsiya. Ushbu maqolada 1 kW quvvatli shamol turbinasi-akkumulyatorli DC mikrotarmoqda 48 V DC shina kuchlanishini barqarorlashtirish uchun PI-rostlagichning ishlashi tadqiq etilgan. Tizim shamol turbinasi, PMDC generatori, pasaytiruvchi o‘zgartirgich hamda ikki yo‘nalishli o‘zgartirgich orqali ulangan 24 V, 50 Ah akkumulyatordan tashkil topgan. Model MATLAB/Simulink muhitida 1 ms diskretlash vaqti bilan simulyatsiya qilingan. Yuklama 450 W darajasida saqlanib, shamol tezligi (8-10-7-12-9) m/s ketma-ketligida o‘zgartirilgan. Natijalar PI-rostlagich quvvat balansini ta’minlashi va o‘tkinchi jarayondan keyin DC shina kuchlanishini 48 V qiymatiga qaytarishini ko‘rsatdi. Biroq shamol tezligining keskin o‘zgarishida akkumulyator quvvati taxminan −0,55 kW gacha pasaydi. DC shina kuchlanishida 54 V gacha ortiqcha rostlanish va 45 V gacha pasayish kuzatildi. Natijalar PI-rostlagichning barqaror holatda qoniqarli ishlashini, ammo keskin shamol o‘zgarishlaridagi dinamik samaradorligi cheklanganligini ko‘rsatdi.

Kalit so’zlar: kichik quvvatli shamol turbinasi; DC mikrotarmoq; PI-rostlagich; akkumulyatorli energiya saqlash tizimi; DC shina kuchlanishi; kuchlanishni rostlash.

Аннотация. В статье исследована работа ПИ-регулятора для стабилизации напряжения шины постоянного тока на уровне 48 В в ветроаккумуляторной микросети мощностью 1 кВт. Система состоит из ветровой турбины, генератора постоянного тока с постоянными магнитами, понижающего преобразователя и аккумулятора 24 В, 50 А·ч, подключённого через двунаправленный преобразователь. Модель была исследована в среде MATLAB/Simulink при фиксированном шаге дискретизации 1 мс. При постоянной нагрузке 450 Вт скорость ветра изменялась в последовательности (8-10-7-12- 9) м/с. Результаты показали, что ПИ-регулятор обеспечивает баланс мощности и возвращает напряжение шины к 48 В после переходного процесса. Однако при резком изменении скорости ветра мощность аккумулятора снижалась примерно до −0,55 кВт. Напряжение шины повышалось до 54 В и снижалось до 45 В. Полученные результаты показывают, что ПИ-регулятор обеспечивает удовлетворительную работу в установившемся режиме, однако его

ISSN 3030-3907

динамические характеристики при резких изменениях скорости ветра ограничены.
Ключевые слова: малая ветровая турбина; микросеть постоянного тока; ПИ-регулятор; аккумуляторная система накопления энергии; напряжение шины постоянного тока; регулирование напряжения.
Abstract. Abstract. This paper investigates the performance of a PI controller for stabilizing the DC-bus voltage at 48 V in a 1 kW wind turbine-battery DC microgrid. The system consists of a wind turbine, a permanent-magnet DC generator, a buck converter, and a 24 V, 50 Ah battery connected through a bidirectional converter. The model was simulated in MATLAB/Simulink using a fixed discrete sampling time of 1 ms. With the load maintained at 450 W, the wind speed was varied in the sequence 8-10-7-12-9 m/s. The results showed that the PI controller maintained the power balance and restored the DC-bus voltage to 48 V after transient disturbances. However, during the rapid wind-speed variation, the battery power decreased to approximately −0.55 kW. The DC-bus voltage increased to 54 V and decreased to 45 V. These results demonstrate that the PI controller provides satisfactory steady-state operation, although its dynamic performance is limited under rapid wind-speed variations.
Keywords: small-scale wind turbine; DC microgrid; PI controller; battery energy storage system; DC-bus voltage; voltage regulation.

KIRISH.

Qayta tiklanuvchi energiya manbalari va akkumulyatorli saqlash tizimlarining rivojlanishi natijasida o‘zgarmas tok (DC) mikrotarmoqlaridan foydalanish kengaymoqda. DC arxitekturasi sinxronlashtirish zaruratini bartaraf etib, energiyani o‘zgartirish bosqichlari va quvvat yo‘qotishlarini kamaytiradi. Biroq shamol tezligi hamda yuklamaning keskin o‘zgarishi quvvat nomutanosibligini yuzaga keltirib, DC shina kuchlanishining barqarorligiga salbiy ta’sir ko‘rsatadi.

O‘zbekistonning olis qishloq hududlarini elektrlashtirish uchun kichik quvvatli shamol energetikasi tizimlarini intellektual boshqarish masalalari Usmonov va hammualliflar tomonidan tadqiq etilgan [1]. Shamol turbinasi–akkumulyatorli DC mikrotarmoqda kuchlanishni adaptiv neyro-noaniq boshqarish va turli ish sharoitlarida tizimning dinamik javobini yaxshilash masalalari keyingi tadqiqotda ko‘rib chiqilgan [2]. Ushbu maqolada esa PI-rostlagichning shamol tezligi o‘zgarishiga javobi alohida tahlil qilinadi.

O‘zbekistonning, xususan Buxoro viloyatining olis qishloq hududlarida qishloq xo‘jaligi infratuzilmasini ishonchli elektr energiyasi bilan ta’minlash

ISSN 3030-3907

muhim masalalardan biridir. Hududda olib borilgan tadqiqotlarda sho‘rlanishga moyil o‘tloqi-allyuvial tuproqlarda ekin yetishtirish [3], suv tanqisligi sharoitida suv tejovchi sug‘orish texnologiyalarini qo‘llash [4] hamda sho‘rlangan yerlarning meliorativ holatini yaxshilash [5] masalalari o‘rganilgan. Mazkur tadqiqotlar elektr ta’minoti masalasini bevosita qamrab olmagan bo‘lsa-da, ularda ko‘rib chiqilgan sug‘orish, monitoring va yordamchi qishloq xo‘jaligi qurilmalari mahalliy elektr energiyasi manbalariga ehtiyoj mavjudligini ko‘rsatadi. Bunday yuklamalarni elektr energiyasi bilan ta’minlashda akkumulyator bilan qo‘llab-quvvatlanadigan kichik quvvatli shamol energetikasi tizimidan foydalanish mumkin. Shu sababli ushbu tadqiqotda shamol–akkumulyatorli DC mikrotarmoq kuchlanishini PI-rostlagich yordamida barqarorlashtirish masalasi ko‘rib chiqiladi.

PI-rostlagich tuzilishining soddaligi, hisoblash resurslariga talabning pastligi va amaliy tizimlarga joriy etish qulayligi sababli sanoatda keng qo‘llaniladi. Uning proporsional qismi boshqaruv xatosiga tezkor javob beradi, integral qismi esa barqaror holatdagi xatoni kamaytiradi. Biroq rostlagichning samaradorligi K_p va K_i koeffitsiyentlarining to‘g‘ri tanlanishiga bog‘liq. Shamol yoki yuklama keskin o‘zgarganda noto‘g‘ri sozlangan PI-rostlagich ortiqcha rostlanish, kuchlanish pasayishi va uzoq barqarorlashish vaqtiga olib kelishi mumkin.

Ushbu tadqiqotda kichik quvvatli shamol turbinasi-akkumulyatorli DC mikrotarmog‘ining matematik modeli ishlab chiqildi va DC shina kuchlanishini barqarorlashtirish uchun PI-rostlagich qo‘llanildi. Rostlagichning ishlashi shamol tezligi va yuklamaning keskin o‘zgarishi ssenariylarida RMSE, IAE, ortiqcha rostlanish, kuchlanish pulsatsiyasi va barqarorlashish vaqti bo‘yicha baholandi.

ADABIYOTLAR TAHLILI.

Akkumulyatorli gibrid qayta tiklanuvchi energiya tizimlarini DC mikrotarmoqlarga integratsiyalash bo‘yicha ko‘plab tadqiqotlar olib borilgan. Ularda energiya manbalarini muvofiqlashtirish, quvvat balansini ta’minlash va shina kuchlanishini barqarorlashtirish uchun an’anaviy hamda intellektual boshqaruv usullari taklif etilgan [1,2].

Adabiyotlarda DC mikrotarmoqlar uchun prognozlash, optimal o‘lchamlash, fuzzy boshqaruv, robust boshqaruv va optimallashtirilgan PI-rostlagichlarga asoslangan usullar taklif etilgan [1-14]. Ushbu usullar tizim barqarorligini yaxshilasa-da, ayrimlari murakkab algoritmlar va katta hisoblash resurslarini talab qiladi. Kichik quvvatli shamol turbinasi-akkumulyatorli DC mikrotarmog‘ida oddiy PI-rostlagichning shamol va yuklama o‘zgarishlariga dinamik javobi esa yetarlicha batafsil o‘rganilmagan.

PV-shamol-akkumulyatorli mikrotarmoq uchun prognozlashga asoslangan energiya boshqaruvi [6] da o‘rganilgan. LSTM modeli yordamida energiya ishlab

ISSN 3030-3907

chiqarish va akkumulyatorning zaryad holati prognozlangan. Usul quvvat balansini yaxshilagan, biroq uning hisoblash murakkabligi amaliy qo‘llash imkoniyatini cheklashi mumkin. PSO-GA va ADRC algoritmlariga asoslangan boshqaruv tizimi [7]da tashqi buzilishlar hamda modellashtirish xatolarini kompensatsiyalash uchun qo‘llanilgan. Ushbu yondashuv barqarorlikni oshirgan bo‘lsa-da, boshqaruv strukturasini murakkablashtirgan.

Fuzzy MPPT va SOC chegaralariga asoslangan energiya boshqaruvi [8]da akkumulyatorni ortiqcha zaryadlanish va chuqur razryaddan himoyalash ko‘rib chiqilgan. Ko‘p manbali PV-shamol-akkumulyator-yoqilg‘i elementi tizimi[9] da quvvat sifatini yaxshilash uchun fuzzy boshqaruv qo‘llanilgan. Tizim barqaror ishlagan, ammo bir nechta energiya saqlash qurilmalarining mavjudligi uning tuzilishini murakkablashtirgan. Gibrid tizim komponentlarini optimal tanlash masalalari [10-14]da o‘rganilgan bo‘lib, asosiy e’tibor iqtisodiy samaradorlik va akkumulyator xizmat muddatiga qaratilgan.

ANN, PID va fuzzy-rostlagichlarning samaradorligi [11]da taqqoslangan. Intellektual boshqaruv usullari kuchlanish va chastotani rostlashda yaxshi natijalar ko‘rsatgan, biroq akkumulyator tomonidagi quvvat dinamikasi batafsil tahlil qilinmagan. Sliding mode control usuli [12]da tashqi buzilishlarga nisbatan yuqori barqarorlikni ta’minlagan, ammo bunday boshqaruvda chattering hodisasi yuzaga kelishi mumkin. Fuzzy-PID va SMES tizimiga asoslangan yondashuv[15] da ortiqcha rostlanish taxminan 24% ga kamaygan, lekin qo‘shimcha qurilmalar tizim narxi va murakkabligini oshirgan.

Ko‘p o’zgartirgichli gibrid tizimlarda MPPT va quvvat oqimini boshqarish strategiyalari [16,17] da ishlab chiqilgan. Ushbu tadqiqotlar energiya balansini yaxshilagan bo‘lsa-da, asosan bir nechta qayta tiklanuvchi energiya manbalarini muvofiqlashtirishga qaratilgan.

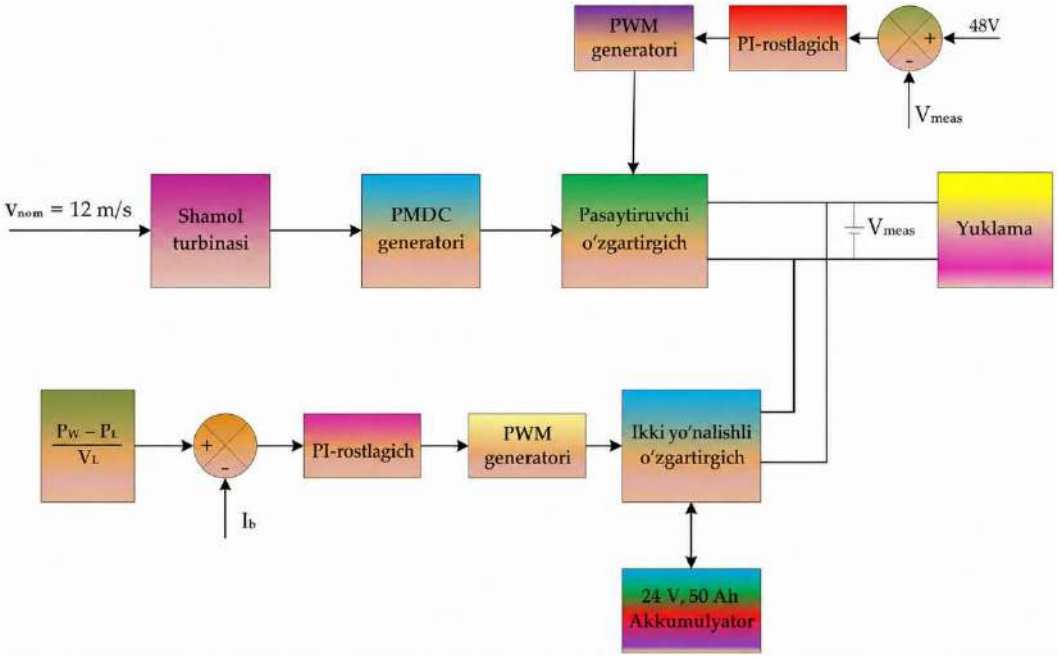
PI-rostlagich yordamida avtonom DC mikrotarmoq kuchlanishini rostlash [13] da o‘rganilgan. Rostlagich koeffitsiyentlarini tanlash uchun African Vulture Optimization algoritmi qo‘llanilib, ortiqcha rostlanish va barqarorlashish vaqti yaxshilangan. Biroq kichik quvvatli shamol turbinasi-akkumulyatorli DC mikrotarmog‘ida oddiy PI-rostlagichning shamol tezligi va yuklamaning keskin o‘zgarishlariga javobi yetarlicha yoritilmagan.

Shunday qilib, mavjud tadqiqotlarda asosan murakkab boshqaruv, prognozlash va optimallashtirish usullariga e’tibor qaratilgan. PI-rostlagichning kichik shamol-akkumulyator tizimidagi dinamik imkoniyatlari va cheklovlarini RMSE, IAE, kuchlanish pulsatsiyasi, ortiqcha rostlanish hamda barqarorlashish vaqti bo‘yicha kompleks baholash masalasi dolzarb bo‘lib qolmoqda.

TADQIQOT METODOLOGIYASI.

ISSN 3030-3907

Tadqiqot obyekti 1 kW quvvatli shamol turbinasi-akkumulyatorli DC mikrotarmoqdan iborat. Shamol turbinasi 12 m/s nominal shamol tezligida o'zgarmas tok generatorini harakatga keltiradi. Generator chiqishi pasaytiruvchi o'zgartirgich orqali 48 V DC shinaga uzatiladi. Tizimga ikki yo'nalishli o'zgartirgich yordamida 24 V, 50 Ah akkumulyator ulangan. PI-rostlagich yordamida boshqariladigan shamol-akkumulyatorli DC mikrotarmoqning umumiy tuzilishi 1-rasmda keltirilgan.



1-Rasm. PI-rostlagich yordamida boshqariladigan shamol-akkumulyatorli DC mikrotarmoqning blok-sxemasi

Shamol turbinasining mexanik quvvati quyidagicha ifodalanadi:

$$P_{sham} = \frac{1}{2}\rho A C_p v^3. \qquad (1)$$

Hisoblashni soddalashtirish uchun turbina parametrlari K_{shamol} doimiysiga birlashtirilgan. Shamol quvvatini DC shinaga uzatishda pasaytiruvchi o'zgartirgichning samaradorligi hisobga olingan.

DC shina kondensatorining dinamikasi quvvat balansi asosida ifodalangan:

$$C\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{P_{kirish} + P_{akk} - P_{yuklama}}{V_{dc}}. \qquad (2)$$

Kirish quvvati, akkumulyator quvvati va yuklama o'rtasida nomutanosiblik yuzaga kelganda DC shina kuchlanishi belgilangan qiymatdan og'adi. Akkumulyatorning terminal kuchlanishi quyidagicha modellashtirilgan:

$$V_{akk} = V_{ocv}(SoC) - IR_{ichk}\,. \qquad (3)$$

Akkumulyatorning zaryad holati Kulon hisoblash usuli yordamida hisoblangan.

ISSN 3030-3907

DC shina kuchlanishini 48 V darajasida saqlash uchun PI-rostlagich qo‘llanilgan. Kuchlanish xatoligi:

$$V_{xato} = V_{dc_tayanch} - V_{dc} \qquad (4)$$

ko‘rinishida aniqlangan. Akkumulyator quvvatiga beriladigan boshqaruv buyrug‘i quyidagicha hisoblangan:

$$P_{akk_dc_buyruq} = K_p V_{xato} + K_i \int V_{xato}\, dt + 0.25 P_{nomutanosiblik}. \qquad (5)$$

Bunda $K_p = 80$va $K_i = 400$. Koeffitsiyentlar yopiq kontur barqarorligini ta’minlash uchun empirik usulda sozlangan. Integral qismning to‘yinishini oldini olish uchun intClamp anti-windup mexanizmi qo‘llanilgan.

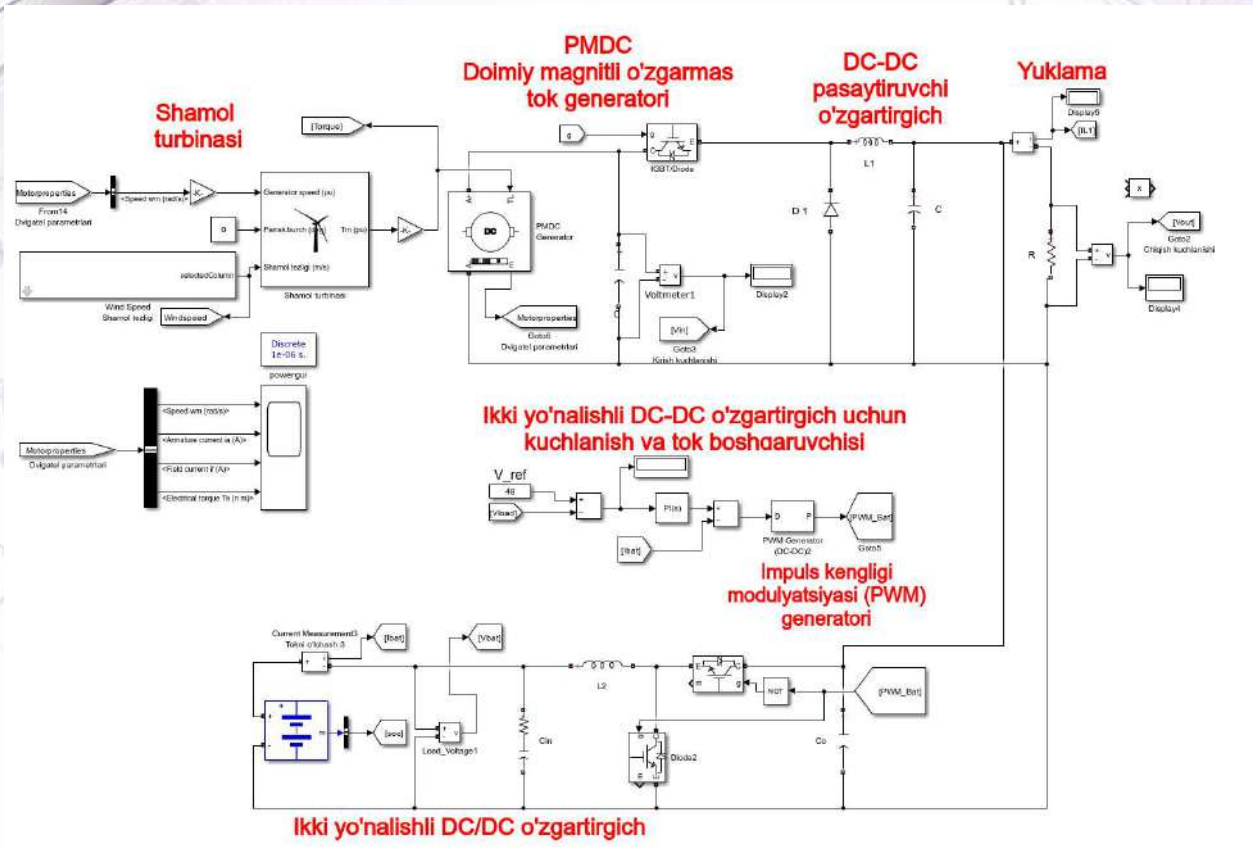
Yuqori boshqaruv konturida o‘lchangan DC shina kuchlanishi 48 V tayanch qiymat bilan taqqoslanadi. PI-rostlagich chiqishi PWM (impuls) generatoriga uzatilib, pasaytiruvchi o’zgartirgichni boshqaradi. Quyi konturda akkumulyator toki uchun tayanch qiymat:

$$I_{akk,tayanch} = \frac{P_W - P_L}{V_L} \qquad (6)$$

Asosida hosil qilinadi. Ushbu qiymat o‘lchangan akkumulyator toki I_{ak} bilan taqqoslanib, ikkinchi PI-rostlagich va PWM generatori orqali ikki yo‘nalishli o’zgartirgich boshqariladi. Shamol quvvati yuklama talabidan yuqori bo‘lganda akkumulyator zaryadlanadi, quvvat yetishmaganda esa yuklamani ta’minlash uchun razryadlanadi.

Yuqorida keltirilgan matematik modellar va boshqaruv tuzilmasi asosida shamol–akkumulyatorli DC mikrotarmoqning MATLAB/Simulink modeli ishlab chiqildi. Model tarkibiga shamol turbinasi, PMDC generatori, pasaytiruvchi o‘zgartirgich, 48 V DC shina, yuklama, ikki yo‘nalishli o‘zgartirgich, akkumulyator hamda PI-rostlagichning kuchlanish va tok konturlari kiritilgan. Ishlab chiqilgan model 2-rasmda keltirilgan.

ISSN 3030-3907



2-Rasm. PI-rostlagich asosidagi shamol–akkumulyatorli DC mikrotarmoqning MATLAB/Simulink modeli

Model MATLAB/Simulink muhitida 1 ms diskretlash vaqti bilan simulyatsiya qilingan. Asosiy tizim parametrlari quyidagicha 1-jadvalda berilgan:

1-Jadval

Tizim parametrlari

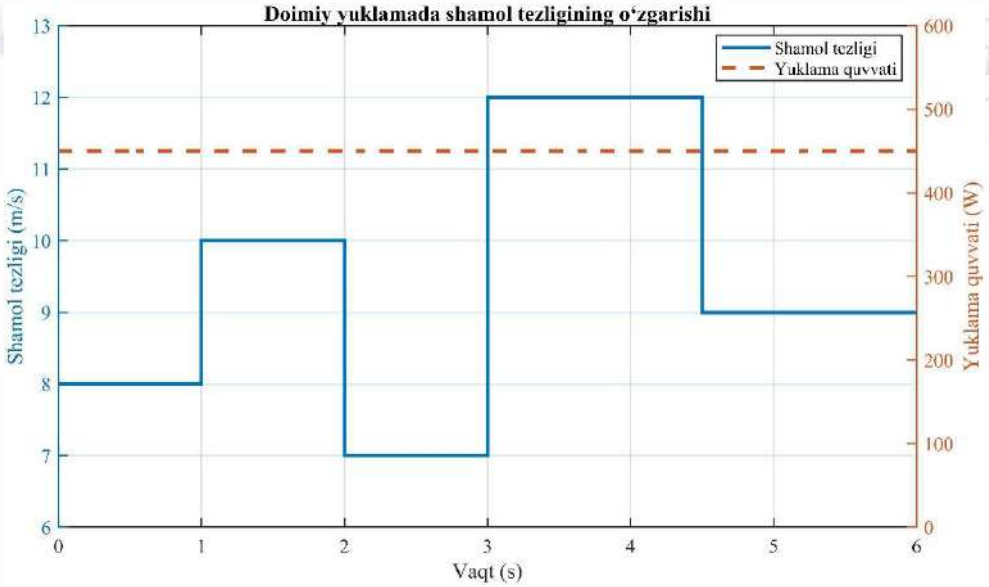
Parametr	Berilishi	Qiymat
Nominal shamol quvvati	$P_{shamol_nominal}$	1000 W
Nominal shamol tezligi	$v_{nominal}$	12 m/s
DC shina kuchlanishi	$V_{dc_tayanch}$	48 V
DC shina sig‘imi	C_{dc}	0.02 F
Akkumulyator	Ah	24 V, 50 Ah
SoC ish diapazoni	SoC	20-95%
Ichki qarshilik	R_{ichki}	0.08 Ω
Diskretlash vaqti	dt	1 ms

PI-rostlagichning ishlashi shamol tezligining o‘zgarishi ssenariysi asosida baholandi. Sinov davomida yuklama 450 W darajasida o‘zgarmas saqlandi. Shamol tezligi dastlab 8 m/s bo‘lib, 1-soniyada 10 m/s gacha oshirildi, 2-soniyada 7 m/s gacha kamaytirildi, 3-soniyada 12 m/s gacha oshirildi va 4,5-soniyada 9 m/s gacha pasaytirildi. Olingan natijalar quvvat taqsimoti, akkumulyator quvvati va DC shina kuchlanishining dinamik o‘zgarishi asosida tahlil qilindi.

ISSN 3030-3907

MUHOKAMA VA NATIJALAR.

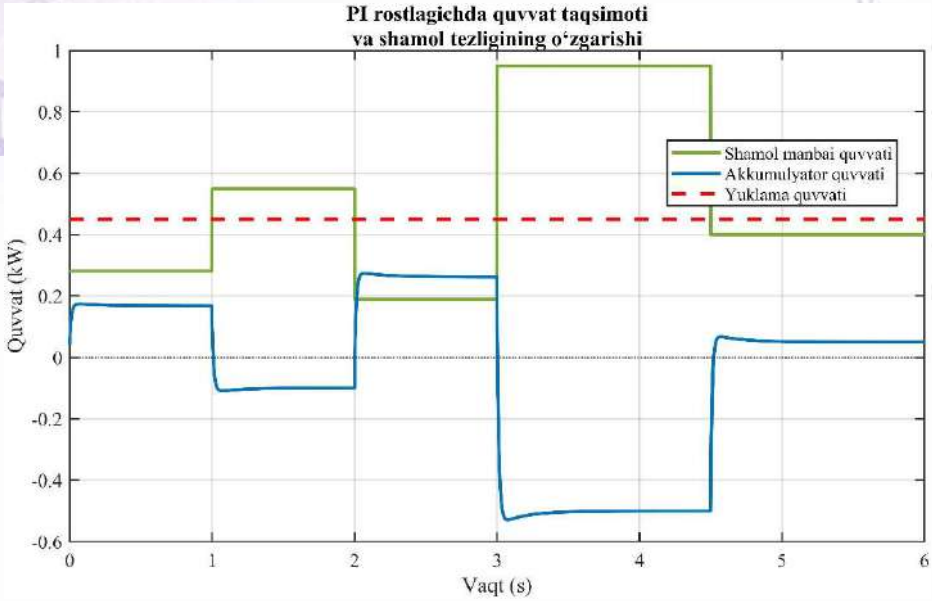
PI-rostlagichning ishlashi yuklama 450 W darajasida o‘zgarmas saqlangan va shamol tezligi bosqichma-bosqich o‘zgartirilgan sharoitda baholandi. Shamol tezligi 1-soniyada 8 m/s dan 10 m/s gacha oshirildi, 2-soniyada 7 m/s gacha kamaytirildi, 3-soniyada 12 m/s gacha oshirildi va 4,5-soniyada 9 m/s gacha pasaytirildi. Eng katta quvvat o‘zgarishi 3-soniyada shamol tezligi 7 m/s dan 12 m/s gacha oshirilganda yuzaga keldi.3-rasmda shamol o’zgarishi va yuklama darjasi berilgan.



3-Rasm. Doimiy yuklamada shamol tezligining o’zgarishi

Shamol quvvati shamol tezligi profiliga mos ravishda o‘zgardi. Shamol tezligi 7 m/s bo‘lganda ishlab chiqarilgan quvvat yuklamani to‘liq ta’minlay olmadi va akkumulyator razryadlanish rejimida ishladi. Shamol tezligi 12 m/s gacha oshirilganda esa ortiqcha energiya hosil bo‘lib, akkumulyator zaryadlanish rejimiga o‘tdi. Bu PI-rostlagich shamol quvvati va yuklama o‘rtasidagi quvvat balansini ta’minlay olishini ko‘rsatdi. 4-rasmda Shamol quvvati shamol tezligi mos ravishda o‘zgarishi ko’rsatilgan.

ISSN 3030-3907

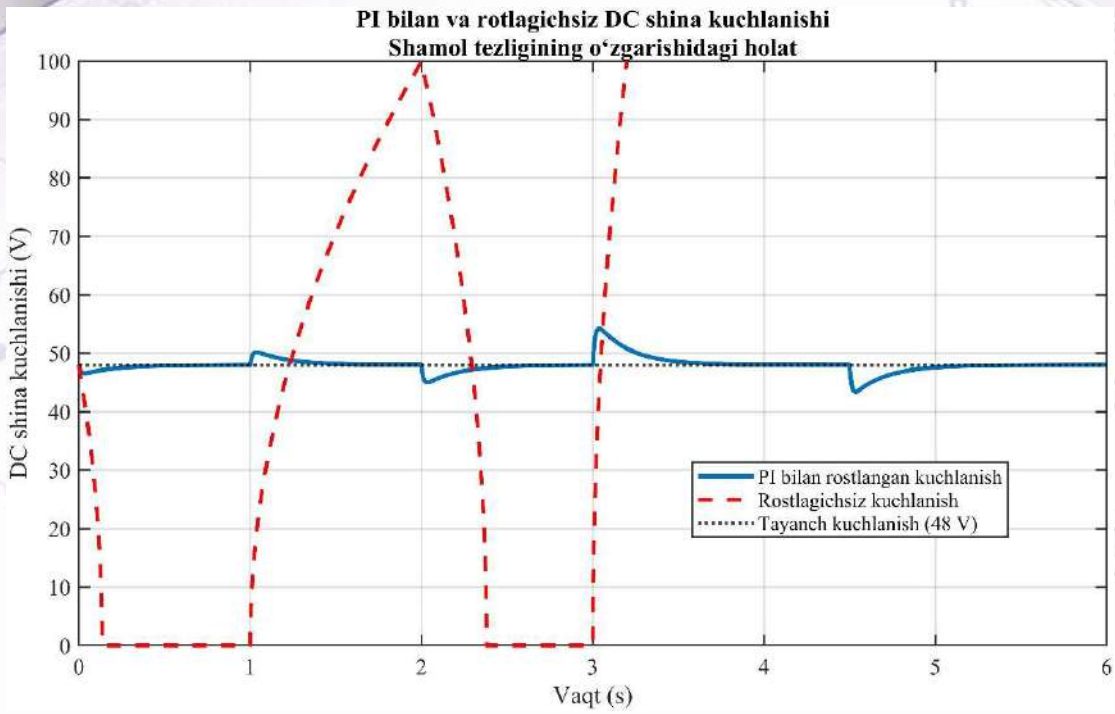


4-Rasm. Shamol quvvati shamol tezligi mos ravishda o‘zgarishi ko’rsatilgan.

Biroq shamol tezligining har bir keskin o‘zgarishida akkumulyator quvvatida tebranishlar kuzatildi. Ayniqsa, 3-soniyada akkumulyator quvvati taxminan −0,55 kW gacha pasaydi. Ushbu o‘tkinchi jarayon PI-rostlagichning keskin shamol o‘zgarishlariga javob berishida yetarli darajada so‘ndirish xususiyatiga ega emasligini ko‘rsatdi.

DC shina kuchlanishining tayanch qiymati 48 V etib belgilandi. Shamol tezligi keskin oshirilgan 3-soniyada kuchlanish taxminan 54 V gacha ko‘tarilib, qariyb 12% ortiqcha rostlanish yuzaga keldi. Shamol tezligi kamaytirilgan 2 va 4,5-soniyalarda esa kuchlanish taxminan 45 V gacha pasaydi. Bu qariyb 6% kuchlanish pasayishiga mos keladi. O‘tkinchi jarayonlardan keyin PI-rostlagich DC shina kuchlanishini 48 V qiymatiga qaytardi va barqaror holatdagi xatolik kichik bo‘ldi. 5-rasm PI va rostlagichsiz DC shinadagi kuchlanishin ko’rsatilgan.

ISSN 3030-3907



5-rasm. PI va rostlagichsiz shinadagi kuchlanish

Natijalar PI-rostlagich barqaror ish rejimida quvvat balansini va DC shina kuchlanishini saqlay olishini ko‘rsatdi. Shu bilan birga, shamol tezligining keskin o‘zgarishlari akkumulyator quvvatida tebranishlar hamda DC shina kuchlanishida sezilarli ortiqcha rostlanish va pasayishlarni yuzaga keltirdi. Demak, o‘zgarmas koeffitsiyentlarga ega PI-rostlagich barqaror holatda qoniqarli ishlasa-da, keskin shamol o‘zgarishlaridagi dinamik samaradorligi cheklangan.

XULOSA VA TAKLIFLAR.

Ushbu tadqiqotda 1 kW quvvatli shamol turbinasi-akkumulyatorli DC mikrotarmoqda 48 V DC shina kuchlanishini barqarorlashtirish uchun PI-rostlagichning ishlashi MATLAB/Simulink muhitida baholandi. Yuklama 450 W darajasida saqlanib, shamol tezligi $8 \rightarrow 10 \rightarrow 7 \rightarrow 12 \rightarrow 9$m/s ketma-ketligida o‘zgartirildi.

Natijalar PI-rostlagich shamol quvvati va yuklama o‘rtasidagi quvvat balansini ta’minlab, akkumulyatorni zaryadlanish va razryadlanish rejimlari o‘rtasida boshqara olishini ko‘rsatdi. O‘tkinchi jarayonlardan keyin DC shina kuchlanishi 48 V qiymatiga qaytdi va barqaror holatdagi xatolik kichik bo‘ldi.

Biroq shamol tezligining keskin o‘zgarishlarida akkumulyator quvvatida tebranishlar kuzatildi. Eng katta o‘zgarish vaqtida akkumulyator quvvati taxminan −0,55 kW gacha pasaydi. DC shina kuchlanishi 54 V gacha ko‘tarilib, qariyb 12% ortiqcha rostlanish hamda 45 V gacha pasayib, qariyb 6% kuchlanish og‘ishini hosil qildi. Bu PI-rostlagich barqaror holatda qoniqarli ishlashini, ammo keskin shamol o‘zgarishlaridagi dinamik samaradorligi cheklanganligini ko‘rsatadi.

ISSN 3030-3907

PI-rostlagichning o‘tkinchi jarayonlardagi tebranishlarini kamaytirish uchun uning K_p va K_i koeffitsiyentlarini yanada takomillashtirish tavsiya etiladi. Shuningdek, olingan simulyatsiya natijalarini amaliy qurilma yoki tajriba stendida tekshirish keyingi tadqiqot vazifasi sifatida qaralishi mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Usmonov, B.; Muinov, U.; Muinova, N.; Chitt, M. Intelligent Control and Automation of Small-Scale Wind Turbines Using ANFIS for Rural Electrification in Uzbekistan. *Energies* 2026, *19*, doi:10.3390/en19030601.
2. Usmonov, B.; Muinov, U.; Usmanov, K.; Muinova, N. Adaptive Neuro-Fuzzy Control of a Small Wind Turbine–Battery DC Microgrid for Remote Electrification in Uzbekistan. In Proceedings of the Designs 2026, 2026.
3. Qodirov, Z.Z.O., I.A.; Tagiyev, A.; Shomurodova, G.; Bobirova, M. Scientific Basis for Soybean Planting in the Condition of Grassy Alluvial Soil Prone to Salinization. *Journal of critical reviews* 2020, *7*, doi:10.31838/jcr.07.04.68.
4. Khamidov, M.; Khamraev, K. Water-saving irrigation technologies for cotton in the conditions of global climate change and lack of water resources. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2020, *883*, doi:10.1088/1757-899x/883/1/012077.
5. Khamidov, M.K.; Khamraev, K.S.; Isabaev, K.T. Innovative soil leaching technology: A case study from Bukhara region of Uzbekistan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2020, *422*, doi:10.1088/1755-1315/422/1/012118.
6. Mahjoub, S.; Chrifi-Alaoui, L.; Drid, S.; Derbel, N. Control and Implementation of an Energy Management Strategy for a PV–Wind–Battery Microgrid Based on an Intelligent Prediction Algorithm of Energy Production. *Energies* 2023, *16*, doi:10.3390/en16041883.
7. Ibrahim, A.L.W.; Xu, J.; Al-Shamma’a, A.A.; Farh, H.M.H.; Aboudrar, I.; Oubail, Y.; Alaql, F.; Alfraidi, W. Optimized Energy Management Strategy for an Autonomous DC Microgrid Integrating PV/Wind/Battery/Diesel-Based Hybrid PSO-GA-LADRC Through SAPF. *Technologies* 2024, *12*, doi:10.3390/technologies12110226.
8. Al-Quraan, A.; Al-Qaisi, M. Modelling, Design and Control of a Standalone Hybrid PV-Wind Micro-Grid System. *Energies* 2021, *14*, doi:10.3390/en14164849.
9. Sahri, Y.; Belkhier, Y.; Tamalouzt, S.; Ullah, N.; Shaw, R.N.; Chowdhury, M.S.; Techato, K. Energy Management System for Hybrid PV/Wind/Battery/Fuel Cell in Microgrid-Based Hydrogen and Economical Hybrid Battery/Super Capacitor Energy Storage. *Energies* 2021, *14*, doi:10.3390/en14185722.

ISSN 3030-3907

10. Jasim, A.M.; Jasim, B.H.; Baiceanu, F.-C.; Neagu, B.-C. Optimized Sizing of Energy Management System for Off-Grid Hybrid Solar/Wind/Battery/Biogasifier/Diesel Microgrid System. *Mathematics* 2023, *11*, doi:10.3390/math11051248.
11. Al Sumarmad, K.A.; Sulaiman, N.; Wahab, N.I.A.; Hizam, H. Energy Management and Voltage Control in Microgrids Using Artificial Neural Networks, PID, and Fuzzy Logic Controllers. *Energies* 2022, *15*, doi:10.3390/en15010303.
12. Maaruf, M.; Khan, K.; Khalid, M. Robust Control for Optimized Islanded and Grid-Connected Operation of Solar/Wind/Battery Hybrid Energy. *Sustainability* 2022, *14*, doi:10.3390/su14095673.
13. Salah, B.; Hasanien, H.M.; Ghali, F.M.A.; Alsayed, Y.M.; Abdel Aleem, S.H.E.; El-Shahat, A. African Vulture Optimization-Based Optimal Control Strategy for Voltage Control of Islanded DC Microgrids. *Sustainability* 2022, *14*, doi:10.3390/su141911800.
14. Shi, Y.; Cheng, S.; Chen, C.; Luo, Y.; Zhao, J.; Ghiasi, M. Modified Biogeography Optimization Strategy for Optimal Sizing and Performance of Battery Energy Storage System in Microgrid Considering Wind Energy Penetration. *Batteries* 2023, *9*, doi:10.3390/batteries9050254.
15. Zaid, S.A.; Alatawi, K.S. Implementation of Fuzzy PID Controller to an Isolated Wind/Battery/Super Magnetic Energy Storage Power System. *Processes* 2025, *13*, doi:10.3390/pr13020515.
16. Gajewski, P.; Pieńkowski, K. Control of the Hybrid Renewable Energy System with Wind Turbine, Photovoltaic Panels and Battery Energy Storage. *Energies* 2021, *14*, doi:10.3390/en14061595.
17. Rekioua, D.; Rekioua, T.; Elsanabary, A.; Mekhilef, S. Power Management Control of an Autonomous Photovoltaic/Wind Turbine/Battery System. *Energies* 2023, *16*, doi:10.3390/en16052286.

ISSN 3030-3907