



Kichik quvvatli doimiy magnitli sinxron generator asosidagi shamol energiyasini o'zgartirish tizimida boshqaruv usullarini baholash

Furqat N. Tuychiev^{1, a}, Abdumannop G'. Abduxalilov¹

^{1, a} PhD, dots., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; tuychievfn@gmail.com
http://orcid.org/0000-0002-1031-3460

¹ Tayanch doktorant, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; abduxalilovabdumannon50@gmail.com https://orcid.org/0009-0008-2179-124X

Dolzarbli: qayta tiklanuvchi energiya manbalari orasida shamol energetikasi tez rivojlanayotgan yo'nalishlardan biri hisoblanadi. O'zbekistonning ko'plab hududlarida shamol tezligi past va o'rtachaligi bilan tavsiflanadi, bu esa kichik quvvatli shamol elektr qurilmalardan maksimal energiya ajratib olish vazifasini murakkablashtiradi, bunday sharoitda maksimal quvvat nuqtasini kuzatish (MPPT) tizimining samaradorligi tanlangan boshqaruv strategiyasiga bevosita bog'liq bo'ladi. Ushbu ishda doimiy magnitli sinxron generator (PMSG) asosidagi shamol energiyasini o'zgartirish tizimi MATLAB/Simulink muhitida modellashtirilib, MPPT boshqaruvi uchun proporsional-integral (PI), proporsional-integral-differensial (PID) va Fuzzy mantiq regulyatorlari ishlab chiqildi hamda bir xil ish sharoitida qiyoslandi. Fuzzy regulyator ikki kirishli (xato va uning hosilasi) va 25 ta lingvistik qoidaga ega Mamdani tipidagi tizim sifatida loyihalandi. Simulyatsiya natijalari uchala regulyatorning rotor aylanish tezligi va elektromagnit moment bo'yicha dinamik jarayonlarini taqqoslash imkonini berdi.

Maqsad: kichik quvvatli shamol energiyasini o'zgartirish tizimini (PMSG asosida) MATLAB/Simulink muhitida modellashtirish hamda MPPT boshqaruvi uchun PI, PID va Fuzzy mantiq regulyatorlarining samaradorligini bir xil ish sharoitida qiyosiy tahlil qilish.

Usullari: shamol turbinasining aerodinamik modeli quvvat koeffitsiyenti $C_p(\lambda, \beta)$ asosida, PMSG esa rotor bilan birga aylanuvchi $d-q$ koordinatalar tizimidagi kuchlanish va moment tenglamalari orqali modellashtirildi. MPPT boshqaruvi optimal tezlik nisbati usuliga asoslanib, etalon rotor tezligini hisoblaydi; hosil bo'lgan tezlik xatosi PI, PID va ikki kirishli (25 qoidali Mamdani tipidagi) Fuzzy mantiq regulyatorlariga uzatildi.

Natijalar: mazkur tadqiqotda PMSG asosidagi kichik quvvatli shamol energiyasini o'zgartirish tizimi MATLAB/Simulink muhitida modellashtirildi va MPPT uchun PI, PID hamda Fuzzy regulyatorlarining samaradorligi qiyosiy tahlil qilindi. Shamol tezligi 8,5 m/s dan 6 m/s gacha pog'onali o'zgartirilganda, tizimning foydali ish koeffitsiyenti har ikkala rejimda ham 0,9074 ni tashkil etib, barcha regulyatorlar barqaror holatda bir xil samaradorlik ko'rsatdi. O'tkinchi jarayonda esa farq sezilarli bo'ldi: PID-regulyator nominal qiymatdan og'ish eng yuqori (15%) va turg'un qiymatga erishish eng ko'p vaqti oladi, Fuzzy regulyator esa nominal qiymatdan og'ish eng past (3%) bo'lib chiqdi.

Kalit so'zlar: PMSG, MPPT, Fuzzy mantiq, PI-regulyator, PID-regulyator, shamol energetikasi, MATLAB/Simulink.

For citation: F.N. Tuychiev, A.G'. Abduxalilov. Evaluation of control methods in a wind energy conversion system based on a low-power permanent magnet synchronous generator. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3, pp. 112-123.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.23219183>

Received: 10.02.2026
Revised: 25.03.2026
Accepted: 13.04.2026
Published: 25.09.2026

Copyright: © Furqat N. Tuychiev, Abdumannop G'. Abduxalilov, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Оценка методов управления в системе преобразования энергии ветра на основе мало мощного синхронного генератора с постоянными магнитами

Фуркат Н. Туйчиев^{1, а}, Абдуманноп Г. Абдухалилов¹

^{1, а}Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; tuychievfn@gmail.com
http://orcid.org/0000-0002-1031-3460

¹Докторант, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; abduxalilovabdumannon50@gmail.com https://orcid.org/0009-0008-2179-124X

Актуальность: среди возобновляемых источников энергии ветровая энергетика является одним из наиболее быстроразвивающихся направлений. Многие регионы Узбекистана характеризуются низкой и средней скоростью ветра, что усложняет задачу извлечения максимальной энергии из ветроустановок малой мощности; в таких условиях эффективность системы отслеживания точки максимальной мощности (MPPT) напрямую зависит от выбранной стратегии управления. В данной работе система преобразования ветровой энергии на основе синхронного генератора с постоянными магнитами (PMSG) была смоделирована в среде MATLAB/Simulink, для управления MPPT разработаны пропорционально-интегральный (PI), пропорционально-интегрально-дифференциальный (PID) и Fuzzy регуляторы, которые сравнивались при одинаковых условиях работы. Fuzzy-регулятор спроектирован как система типа Мамдани с двумя входами (ошибка и её производная) и 25 лингвистическими правилами. Результаты моделирования позволили сопоставить динамические отклики всех трёх регуляторов по скорости вращения ротора и электромагнитному моменту.

Цель: моделирование системы преобразования ветровой энергии малой мощности на основе PMSG в среде MATLAB/Simulink, а также сравнительный анализ эффективности PI, PID и Fuzzy-регуляторов



MPPT при одинаковых условиях работы.

Методы: аэродинамическая модель ветротурбины построена на основе коэффициента мощности $C_p(\lambda, \beta)$, а PMSG смоделирован уравнениями напряжения и момента во вращающейся системе координат d-q. Управление MPPT основано на методе оптимального коэффициента быстроходности, формирующем эталонную скорость ротора; полученная ошибка скорости подавалась на PI, PID и нечёткий Fuzzy (Мамдани, 25 правил) регуляторы с двумя входами.

Результаты: в рамках данного исследования система преобразования ветровой энергии малой мощности на основе PMSG была смоделирована в среде MATLAB/Simulink, и проведён сравнительный анализ эффективности PI, PID и Fuzzy-регуляторов MPPT. При ступенчатом изменении скорости ветра от 8,5 м/с до 6 м/с КПД системы в обоих режимах составил 0,9074, при этом все регуляторы показали одинаковую эффективность в установившемся состоянии. В переходном процессе выявлена существенная разница: ПИД-регулятор показал наибольшее перерегулирование (15%) и самое медленное установление, тогда как Fuzzy-регулятор показал наименьшее перерегулирование (3%) - это подтвердило превосходство нечёткой логики в условиях переменного ветра.

Ключевые слова: PMSG, MPPT, Fuzzy нечёткая логика, PI регулятор, PID регулятор, ветровая энергетика, MATLAB/Simulink.

Evaluation of control methods in a wind energy conversion system based on a low-power permanent magnet synchronous generator

Furqat N. Tuychiev^{1,a}, Abdumannop G. Abdukhalilov¹

^{1, a)} PhD, assoc. prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; tuychievfn@gmail.com
http://orcid.org/0000-0002-1031-3460

¹ PhD Student, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; abdualilovabdumannon50@gmail.com
https://orcid.org/0009-0008-2179-124X

Relevance: among renewable energy sources, wind energy is one of the fastest-developing sectors. Many regions of Uzbekistan are characterized by low and moderate wind speeds, which complicates the extraction of maximum energy from small-capacity wind installations; under such conditions, the efficiency of the maximum power point tracking (MPPT) system depends directly on the chosen control strategy. In this study, a wind energy conversion system based on a permanent magnet synchronous generator (PMSG) was modeled in MATLAB/Simulink, and proportional-integral (PI), proportional-integral-derivative (PID), and Fuzzy logic controllers were developed for MPPT control and compared under identical operating conditions. The Fuzzy controller was designed as a Mamdani-type system with two inputs (error and its derivative) and 25 linguistic rules. The simulation results allowed the dynamic responses of all three controllers to be compared in terms of rotor speed and electromagnetic torque.

Aim: to model a small-capacity PMSG-based wind energy conversion system in MATLAB/Simulink and to comparatively evaluate the effectiveness of PI, PID, and Fuzzy logic MPPT controllers under identical operating conditions.

Methods: the wind turbine's aerodynamic model was built on the power coefficient $C_p(\lambda, \beta)$, and the PMSG was modeled using voltage and torque equations in the rotor-synchronous d-q reference frame. MPPT control was based on the tip-speed-ratio method to compute the reference rotor speed; the resulting speed error was fed to PI, PID, and a two-input, 25-rule Mamdani-type Fuzzy logic controller.

Results: in this study, a small-capacity PMSG-based wind energy conversion system was modeled in MATLAB/Simulink, and a comparative analysis of PI, PID, and Fuzzy MPPT controllers was carried out. When wind speed was stepped from 8,5 m/s to 6 m/s, the system's efficiency was 0.9074 in both regimes, with all controllers performing equally well in steady state. A significant difference emerged in the transient response: the PID controller showed the largest overshoot (15%) and the slowest settling time, while the Fuzzy controller showed the smallest overshoot (3%) — confirming the superiority of fuzzy logic under variable wind conditions.

Keywords: PMSG, MPPT, Fuzzy logic, PI controller, PID controller, wind energy, MATLAB/Simulink.

1. Kirish (Introduction)

Qayta tiklanadigan energiya manbalaridan foydalanish bugungi kunda jahon energetikasining ustuvor yo'nalishlaridan va eng tez sur'atlar bilan rivojlanayotgan tarmoqdan biri hisoblanadi. Xalqaro hisobotlarga ko'ra, dunyo bo'yicha o'rnatilgan shamol qurilmalarining umumiy quvvati 2024 yil yakuniga kelib 1,14 TW dan oshdi va o'sha yilning o'zida 117 GW yangi quvvat ishga tushirilib, ketma-ket ikkinchi marta rekord ko'rsatkich qayd etildi [1]. Mutaxassislarining baholashicha, 2030 yilga qadar qo'shimcha 981 GW ga yaqin shamol quvvati o'rnatilishi kutilmoqda [2]. Bunday jadal o'sish shamol energiya qurilmalarini samarali modellashtirish va boshqarish masalalarini dolzarb ilmiy-texnik vazifa darajasiga ko'taradi.

O'zbekiston hududining katta qismi past va o'rtacha shamol tezligi bilan tavsiflanadi [3]. Bunday sharoitda yirik turbinalarga qaraganda, kichik quvvatli qurilmalar maqbulroq hisoblanadi. Ular ham avtonom (off-grid) iste'molchilarni ham tarmoqqa ulangan (on-grid) rejimda ortiqcha energiyani tarmoqqa uzatish uchun qo'llaniladi. Shu bois shamol tezligi past bo'lgan sharoitga moslashgan, samara-

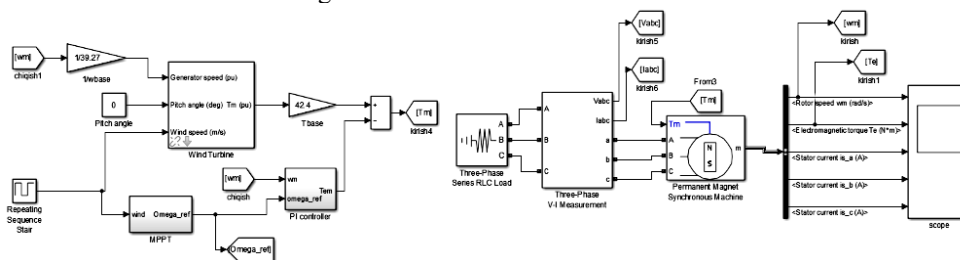
li boshqaruv tizimiga ega kichik quvvatli qurilmalarni ishlab chiqish dolzarb vazifa hisoblanadi.

Shamol tezligi o'zgarmas bo'lgan sharoitda qisqa tutashgan rotorli asinxron generatorli (QTAG) shamol turbinalari, shamol tezligi o'zgaruvchan bo'lgan sharoitda esa ikki tomonlama taminladigan asinxron generatorli (ITTAG) va doimiy magnitli sinxron generatorli (DMSG) shamol turbinalari keng qo'llaniladi [5]. ITTAG arzonligi hamda aktiv va reaktiv quvvatni mustaqil boshqarish imkoniyati tufayli uzoq yillar yetakchi o'ringa ega bo'lib kelgan, biroq statorining tarmoqqa bevosita ulanishi uni kuchlanish o'zgarishlariga sezgir qiladi, kontaktli halqalariga esa muntazam texnik xizmat ko'rsatish talab etadi [6]. DMSG esa doimiy magnitlar yordamida qo'zg'atilib alohida qo'zg'atish va kontaktli halqalar talab etmaydi [6, 12]. Bundan tashqari DMSG reduktorsiz, ya'ni to'g'ridan-to'g'ri sxemasida ishlash imkonini berib, mexanik yo'qotishlarni va texnik xizmat xarajatlarini sezilarli kamaytiradi. Qiyosiy tadqiqotlarda nominal shamol tezligida QTAG, ITTAG va DMSG ning foydali ish ko'effitsientlari mos ravishda 66,25%, 69,38% va 71,88% ni tashkil etishi keltirilgan [14]. Shu sabablarga ko'ra DMSG, ayniqsa kichik va o'rta quvvatli qurilmalarda, tobora istiqbolli generator turi sifatida qaralmoqda.

Shamol energiya boshqa turdagi energiya manbalariga qaraganda o'zgaruvchan va turg'un bo'lmagan resurs hisoblanadi, shuning uchun shamolning har qanday tezligida ham undan maksimal foydalanish uchun o'zgaruvchan tezlikli turbinalardan foydalaniladi [1,2]. Shamol tezligi doimo o'zgarib turgani sababli, rotor tezligini ham unga moslab uzluksiz sozlab borish kerak, aks holda turbina quvvatning bir qismini yo'qotadi. Aynan shu vazifani maksimal quvvat nuqtasini kuzatish (MPPT) tizimi bajaradi: u generator momentini boshqarish orqali rotorni har bir shamol tezligiga mos optimal tezlikda ushlab turadi va shu yo'l bilan shamol oqimidan imkoni boricha ko'proq energiya olish imkonini beradi [5].

2. Tizim modeli va boshqaruv usullari (System model and control methods)

Zamonaviy muqobil energetika sohasida DMSG asosidagi shamol energiyasini o'zgartirish tizimlari (ShEO'T) o'zining yuqori ishonchiligi va samaradorligi bilan alohida ajralib turadi. ShEO'T quyidagi asosiy qismlardan iborat: shamol turbinalari, doimiy magnitli sinxron generator (DMSG), elektr yuklama va MPPT boshqaruv regulyatori. Tadqiqot doirasida ko'rib chiqilayotgan va MATLAB/Simulink dasturiy muhitida ishlab chiqilgan DMSG asosidagi ShEO'Tning to'liq funksional modeli 1-rasmda keltirilgan.



1-rasm. DMSG asosidagi shamol energiyasini o'zgartirish tizimining (ShEO'T) Simulink modeli
Fig.1. Simulink model of the PMSG-based wind energy conversion system (WECS)

Shamol tezligi pog'onali manba (*Repeating Sequence Stair*) yordamida shakllantiriladi va Wind Turbine blokiga uzatiladi. Turbina shamolning kinetik energiyasini mexanik aylanma momentga aylantiradi, bunda kurak burchagi (*pitch angle*) nolga teng deb qabul qilingan, chunki tizim nominal tezlikdan past rejimda (MPPT hududi) ishlaydi. Hosil bo'lgan mexanik moment generator validiga uzatiladi va DMSG uni uch fazali elektr energiyasiga aylantiradi. Generator chiqishi uch fazali o'lchash bloki (*V-I Measurement*) orqali yuklamaga (*Three-Phase Series RLC Load*) ulanadi.

Aerodinamik model. Shamol energetikasi tizimida havo oqimining kinetik energiyasi turbina parraklari yordamida mexanik aylanma harakatga, so'ngra generator orqali elektr energiyasiga aylantiriladi. parraklarga ta'sir etuvchi shamol tezligi (V) ularning aylanishiga va mexanik quvvatning generator validiga uzatilishiga olib keladi. Havo oqimidan olinadigan quvvat turbinaning o'lchami va shamol tezligiga bog'liq bo'lib, uni boshqarishning bir necha usuli mavjud. Ushbu tadqiqotda standart boshqaruv usullaridan biri - moment boshqaruvi tanlangan, ya'ni generator momentini sozlash orqali rotor optimal tezlikda ushlab turiladi. Turbinaning aerodinamik xususiyatlari quyidagi tenglamalar bilan tavsiflanadi.

Shamol oqimidagi kinetik quvvat. Ma'lum bir maydondan o'tuvchi havo oqimi kinetik energiyaga ega bo'lib, undagi to'liq quvvat shamol tezligining kubiga proporsionaldir:

$$P_{shamol} = \frac{1}{2} \rho A V^3 ; \quad (1)$$

bu yerda ρ - havo zichligi ($1,225 \text{ kg/m}^3$), $A = \pi R^2$ - turbina parraklarining qamrov maydoni (m^2), V - shamol tezligi (m/s).



Turbinaning mexanik quvvati. Betz qonuniga ko'ra, turbina shamoldagi quvvatning hammasini emas, balki faqat bir qismini ajratib oladi. Bu ulush quvvat koeffitsiyenti C_p orqali ifodalanadi:

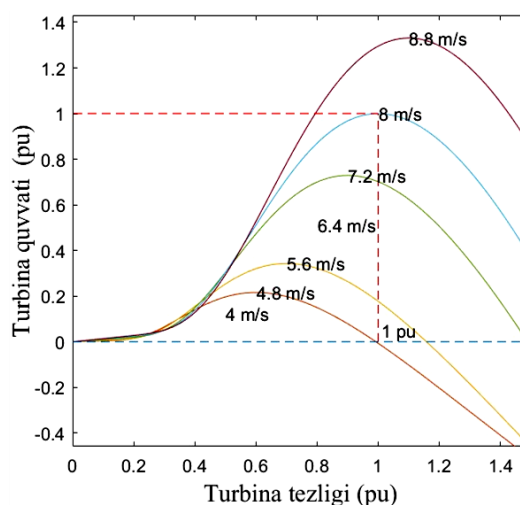
$$P_{mex} = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p(\lambda, \beta). \quad (2)$$

C_p turbinaning aerodinamik samaradorligini bildiradi va nazariy jihatdan 0,593 (Betz chegarasi) dan oshmaydi. Amalda zamonaviy turbinalar uchun bu qiymat odatda 0,4–0,52 oralig'ida bo'ladi. C_p qancha yuqori bo'lsa, turbina shamoldan shuncha ko'p energiya oladi.

Tezlik nisbati. Quvvat koeffitsiyenti o'zgarmas son emas - u tezlik nisbati λ ga bog'liq. Tezlik nisbati rotor uchining chiziqli tezligini shamol tezligiga nisbati sifatida aniqlanadi:

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{V}; \quad (3)$$

bu yerda ω_m - rotorning burchak tezligi (rad/s), R - rotor radiusi (m). λ ning fizik ma'nosi quyidagicha: u rotor parraklari shamolga nisbatan qanchalik tez aylanayotganini ko'rsatadi. Har bir turbina uchun C_p maksimal bo'ladigan aniq bir optimal qiymat - λ_{opt} mavjud MPPT tizimining asosiy vazifasi - shamol o'zgarganda ham rotorni shu λ_{opt} da ushlab turishdir.



2-rasm. Turbina quvvat xarakteristikasi

Fig.2. Turbine power characteristic

Quvvat koeffitsiyenti. C_p ning tezlik nisbati λ va kurak burchagi β ga bog'liqligi quyidagi empirik tenglama orqali beriladi:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda; \quad (4)$$

bu yerda yordamchi kattalik λ_i quyidagicha hisoblanadi:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}; \quad (5)$$

$c_1 \dots c_6$ koeffitsiyentlari turbina kuraklarining geometriyasiga bog'liq va Simulink turbina blokida oldindan belgilangan. Ushbu tadqiqotda tizim nominal tezlikdan past rejimda (MPPT hududida) ishlagani uchun kurak burchagi $\beta = 0$ deb qabul qilingan. Bu holda (4) tenglamadagi $c_3 \beta$ had nolga aylanadi va C_p faqat tezlik nisbati λ ning funksiyasiga aylanadi.

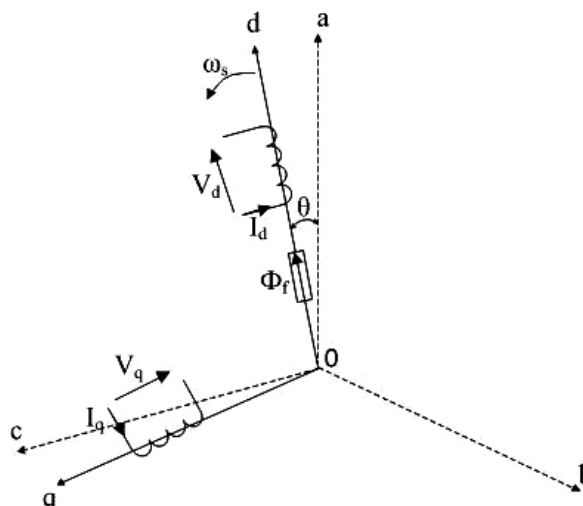
Aerodinamik moment. Turbina validiga uzatiladigan mexanik moment quvvatni burchak tezligiga bo'lish orqali topiladi:

$$T_m = \frac{P_{mex}}{\omega_m} = \frac{1}{2 \omega_m} \rho A V^3 C_p. \quad (6)$$

Aynan shu moment T_m generator validiga ta'sir qiladi va DMSG ning aylanishini ta'minlaydi. Boshqaruv tizimi generatorning qarama-qarshi (elektromagnit) momentini sozlash orqali T_m bilan muvozanatni o'rnatadi va shu yo'l bilan rotor tezligini optimal qiymatda ushlab turadi.

DMSG ning d-q modeli. Doimiy magnitli sinxron generatorning uch fazali kattaliklari vaqt bo'yicha sinusoidal ravishda o'zgaradi, bu esa matematik tahlilni murakkablashtiradi. Shu sababli generatorning matematik modeli rotor bilan birga aylanuvchi dinamik d-q koordinatalar tizimida quriladi [7]. Bunda d o'qi rotor magnit maydoni yo'nalishi bilan, q o'qi esa unga perpendikular yo'nalishda joylashadi. Natijada o'zgaruvchan kattaliklar doimiy qiymatlarga aylanadi va boshqaruv

ancha soddalashadi. abc va $d-q$ kuchlanishlarining vektor diagrammasi 3-rasmda keltirilgan..



3-rasm. DMSG ning abc va $d-q$ koordinata o'qlarining fazoviy joylashuvi

Fig.3. Spatial arrangement of the abc and $d-q$ coordinate axes of the PMSG

Statorning d va q o'qlardagi kuchlanish tenglamalari mos ravishda (7) va (8) ifodalar orqali yoziladi:

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q;$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f;$$

bu yerda L_d va L_q - statorning d va q o'qlardagi induktivliklari; R_d va R_q - mos aktiv qarshiliklar; i_d va i_q - generatorning d va q o'qlardagi toklari; ψ_f - doimiy magnit oqimi; ω_e - elektr burchak tezlik, u mexanik burchak tezlik bilan qutb juftlari soni orqali bog'lanadi:

$$\omega_e = p \omega_m;$$

bu yerda p - juft qutblari soni. Generatorning aylanuvchi $d-q$ koordinatalar tizimidagi elektromagnit momenti (T_e) quyidagi tenglama orqali ifodalanadi:

$$T_e = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) i_d i_q + \psi_f i_q].$$

Rotor yuzasiga o'rnatilgan magnitlar qo'llanilganligi sababli, d va q o'qlari bo'yicha induktivliklar o'zaro teng $L_d = L_q$ bo'lgani uchun (11) ifoda sezilarli darajada soddalashadi:

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_f i_q.$$

Demak, elektromagnit momentni i_q tok tashkil etuvchisini boshqarish orqali o'zgartirish mumkin, shu sababli u moment hosil qiluvchi tok tashkil etuvchisi deb ataladi. Aynan shu tok orqali elektromagnit moment mexanik momentga, u orqali esa mexanik quvvatga moslashtirilib, MPPT sharti bajariladi. DMSG modeli harakat tenglamasi bilan yakunlanadi:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} [T_e - T_m - F \omega_m].$$

Ko'rinib turibdiki, DMSG modeli ikkinchi tartibli tizim bo'lib, rotor oqimi kabi o'zgarmas parametrga ega. Sinxron generatorning aktiv va reaktiv quvvatlari mos ravishda (14) va (15) ifodalar bilan aniqlanadi:

$$P_g = \frac{3}{2} [v_d i_d + v_q i_q];$$

$$Q_g = \frac{3}{2} [v_q i_d - v_d i_q].$$

MPPT strategiyasi. Shamol turbinasidan maksimal quvvat ajratib olish uchun rotor har bir shamol tezligida optimal tezlik nisbatiga λ_{opt} mos keladigan aniq bir tezlikda aylanishi kerak. Buni ta'minlashning bir necha usuli mavjud bo'lib, ulardan eng keng tarqalgani - optimal tezlik nisbati usulidir [15, 19]. Ushbu usulda joriy shamol tezligi o'lchanadi va unga mos keluvchi etalon rotor tezligi to'g'ridan-to'g'ri hisoblanadi [19]. Optimal tezlik nisbati usulining afzalligi - soddaligi va tez ishlashida; u λ ni doimo λ_{opt} da ushlab turish orqali C_p ni maksimal qiymatda saqlaydi [7].

Tezlik nisbatining ta'rifidan kelib chiqib, λ ni λ_{opt} ga tenglashtirsak, etalon rotor tezligi

quyidagicha topiladi:

$$\omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} V}{R}.$$

Bu ifoda shuni anglatadiki, tashqi muhitdagi shamol tezligi o'zgargan zahoti etalon tezlik ham unga proporsional ravishda o'zgaradi va shu yo'l bilan turbina doimo optimal aerodinamik nuqtada ishlaydi [19].



4-rasm. MPPT blokining ichki tuzilishi

Fig.4. Internal structure of the MPPT block

Hisoblangan $\omega_{ref} = 40$ rad/s qiymati generatorning nominal tezligiga (375 ayl/min) deyarli to'liq mos keladi, bu esa tanlangan turbina va generator parametrlarining o'zaro muvofiqligini tasdiqlaydi (4-rasm). Hosil bo'lgan etalon tezlik generatorning haqiqiy tezligi (ω_m) bilan solishtiriladi va ular orasidagi xato signali boshqaruv regulyatoriga uzatiladi.

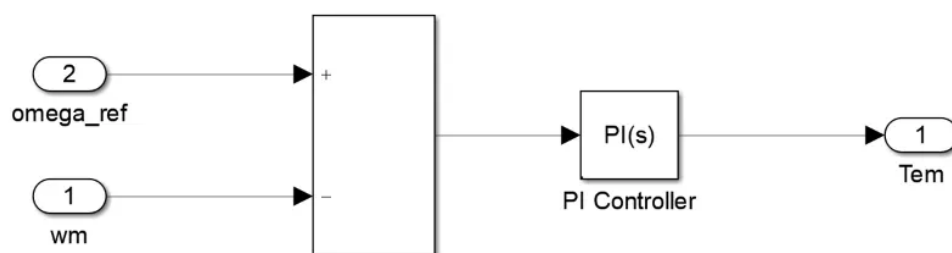
Boshqaruv regulyatorlari. PI-regulyator. Proporsional-integral (PI) regulyator klassik boshqaruv usullari orasida eng keng tarqalgani bo'lib, soddaligi, ishonchliligi va sozlash qulayligi tufayli shamol energetikasi tizimlarida asosiy taqqoslash mezonini sifatida qo'llaniladi [18, 19]. Uning Ishlash prinsipi regulyator rotorning haqiqiy aylanish tezligini (ω_m) MPPT bloki bergan etalon tezlik (ω_{ref}) bilan uzluksiz solishtirib turadi va ular orasidagi farqqa - boshqaruv xatosiga - qarab generator momentini sozlaydi. Boshqaruv xatosi quyidagicha aniqlanadi:

$$e = \omega_{ref} - \omega_m.$$

Regulyatorning vazifasi tezlik xatosini nolga keltirish, ya'ni rotorni har bir shamol tezligiga mos optimal tezlikda ushlab turishdir. PI-regulyatorlarda proporsional had joriy xatoga mutanosib tezkor javobni ta'minlaydi, ammo qoldiq xatoni yo'qota olmaydi, integral had esa xatoni vaqt bo'yicha jamlab, turg'un holatdagi xatoni bartaraf etadi va rotor tezligini etalon qiymatga aniq olib keladi. Boshqaruv qonuni quyidagicha ifodalanadi:

$$T_{ref} = K_p e + K_i \int_0^t e dt;$$

bu yerda T_{ref} - generatorning etalon momenti; e - tezlik xatoligi; $K_p=2$ - proporsional koeffitsiyent; $K_i=1$ - integral koeffitsiyent. (18) ifodadagi birinchi had tizimning tezkorligini, ikkinchisi esa turg'un holatdagi aniqligini ta'minlab, tezlik va aniqlik o'rtasida muvozanatni yuzaga keltiradi.



5-rasm. PI-regulyatorning Matlab/Simulink

Fig.5. PI controller in Matlab/Simulink

PID-regulyator PI-regulyatorga differensial (D) had qo'shilgan kengaytirilgan ko'rinishdir. Proporsional va integral hadlar avvalgi vazifasini bajaradi, differensial had esa xatoning o'zgarish tezligiga (de/dt) mutanosib ishlab, o'tkinchi jarayonni tezlashtiradi va tebranihlarni so'ndiradi. Boshqaruv qonuni quyidagicha:

$$T_{ref} = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt};$$

bu yerda K_d - differensial koeffitsiyent. Bu had shamol tezligi keskin o'zgarganda tezroq reaksiyani ta'minlaydi, biroq o'lchov shovqiniga sezgir bo'lib, etalon qiymatdan oshib ketishga olib kelishi mumkin [18] shu bois K_d ni tanlashda tezkorlik va barqarorlik o'rtasida muvozanat talab etiladi.



Modelda PID-regulyator PI bilan bir xil tuzilmada amalga oshirilgan, farqi Simulink regulyator blokida K_d ning noldan farqli o'rnatilishida.

Fuzzy mantiq regulyatori klassik PI/PID regulyatorlardan farqli ravishda tizimning aniq matematik modelini talab qilmaydi, balki inson tajribasiga asoslangan lingvistik qoidalar orqali boshqaruvni amalga oshiradi [15,19]. Bu xususiyat shamol turbinasi kabi nochiziqli va o'zgaruvchan tizimlar uchun ayniqsa qulaydir, chunki bunday obyektlarning aniq modelini qurish murakkab [19].

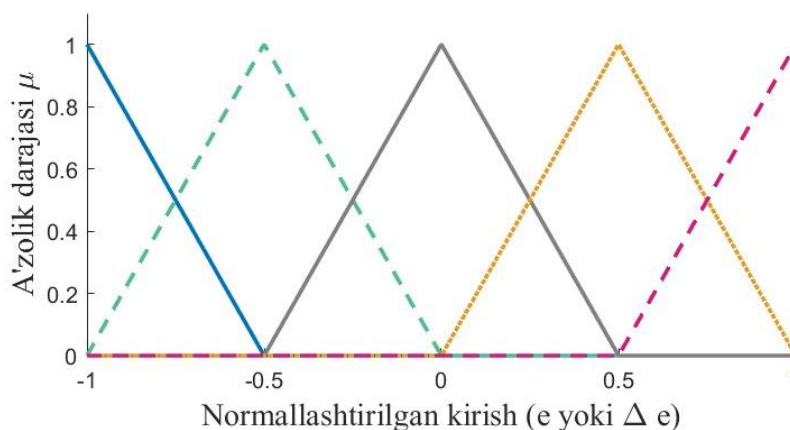
Ushbu tadqiqot doirasida Mamdani tipidagi ikki kirishli noaniq mantiq (fuzzy) regulyatori ishlab chiqildi; bunda tizim kirishlari sifatida tezlik xatoligi ($e = \omega_{ref} - \omega_m$) hamda uning vaqt bo'yicha o'zgarish tezligi ($\Delta e = de/dt$) qabul qilingan bo'lib, chiqish signali generatorni boshqarishga yo'naltirilgan. Bu tuzilma adabiyotlarda keng qo'llaniladigan standart konfiguratsiyaga mos keladi [18, 19]. Boshqaruv ifodasi quyidagicha:

$$u = K_u \cdot f_{fuzzy}(e, \Delta e);$$

bu yerda f_{fuzzy} - qoidalar bazasi orqali aniqlanadigan nochiziqli funktsiya, K_u - chiqish kuchaytirish koeffitsiyenti.

Regulyator uch bosqichda ishlaydi. Fuzzifikatsiya bosqichida aniq kirish qiymatlari uchburchak a'zolik funksiyalari yordamida beshta lingvistik atamaga - NB, NS, Z, PS, PB - aylantiriladi (6-rasm). Xulosa chiqarish bosqichida Mamdani usuli bo'yicha $5 \times 5 = 25$ ta qoidadan iborat baza qo'llaniladi (1-jadval). Defuzzifikatsiya bosqichida natija og'irlik markazi usuli bilan aniq songa aylantirilib, K_u orqali masshtablanadi.

Qoidalar bazasi simmetrik tuzilgan: e va Δe bir xil ishorada katta bo'lganda chiqish maksimal (NB/PB), ikkala kirish nolga yaqin bo'lganda esa nol (Z) qiymat oladi, bu boshqaruvning silliq ishlashini ta'minlaydi [18].



6-rasm. Fuzzy regulyatorning kirish a'zolik funksiyalari - NB, NS, Z, PS, PB uchburchaklari

Fig.6. Input membership functions of the fuzzy controller — triangular NB, NS, Z, PS, PB sets

1-jadval. Fuzzy qoidalar bazasi

Table 1. Fuzzy rule base

$e \setminus \Delta e$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	Z
NS	NB	NB	NS	Z	PS
Z	NB	NS	Z	PS	PB
PS	NS	Z	PS	PB	PB
PB	Z	PS	PB	PB	PB

3. Modellastirish natijalar va muhokama (Simulation results and discussion)

Tizimning energetik ko'rsatkichlari ikki ish rejimida — nominal 8,5 m/s va past 6 m/s shamol tezligida baholandi. Har bir rejimda turbinaning mexanik quvvati P_{mex} , generatorning elektr quvvati P_{el} , elektromagnit moment T_e va foydali ish koeffitsiyenti η qayd etildi. Natijalar 3-jadvalda keltirilgan.

Tizimning ish rejimi MPPT regulyatori orqali boshqariladi. MPPT bloki joriy shamol tezligiga mos optimal rotor tezligini ω_{ref} hisoblaydi. Bu qiymat generatorning haqiqiy tezligi ω_m bilan solishtiriladi va xato signali boshqaruv regulyatoriga (PI, PID yoki Fuzzy mantiq) uzatiladi. Regulyator generatorning etalon momentini shakllantirib, rotorni optimal tezlikda ushlab turadi va shu yo'l bilan shamoldan maksimal quvvat ajratib olinadi. Asosiy parametrlar 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval. Modelni asosiy parametrlari
Table 2. Main parameters of the model

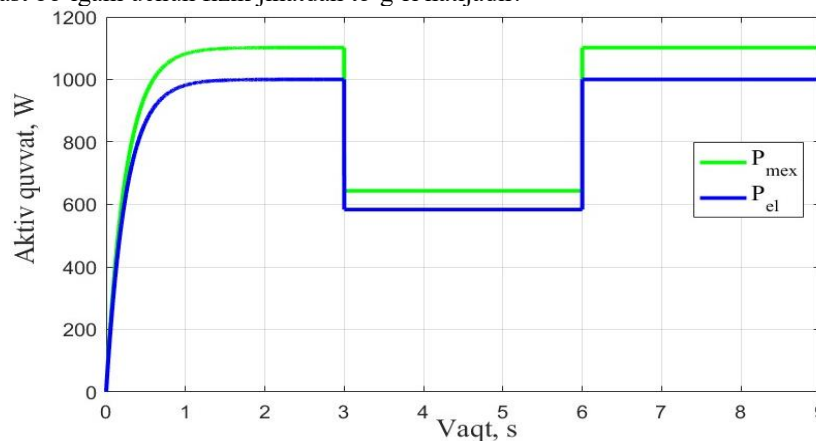
Parametr	Belgi	Qiymat	Birlik
Shamol turbinasi			
Nominal quvvat	P_n	1000	W
Rotor radiusi	R	1,4	m
Turbina parraklarining qamrov maydoni	A	6,15	m ²
Nominal shamol tezligi	V_{nom}	8,5	m/s
Ishga tushish tezligi	V_{cut-in}	3	m/s
Tormozlanish tezligi	$V_{cut-out}$	25	m/s
Kuraklar soni	-	3	-
Optimal tezlik nisbati	λ_{opt}	7	-
DMSG			
Stator qarshiligi	R_s	0,9	Ω
Induktivlik ($d-q$)	$L_d = L_q$	0,02	H
Magnit oqimi ilashuvchanligi	ψ_f	0,3	V·s
Qutb juftlari soni	p	8	-
Inertsia momenti	J	0,03	kg·m ²
Ishqalanish koeffitsiyenti	F	0,003	N·m·s

Nominal rejimda turbinaning mexanik quvvati 1102 W ga teng bo'lib, bu generatorning nominal quvvatiga (1000 W) deyarli to'liq mos keladi va tizimning to'liq yuklanish rejimida ishlayotganini ko'rsatadi. Past rejimda (6 m/s) mexanik quvvat 643,3 W, elektr quvvati esa 583,7 W gacha kamayadi (3-jadval, 7-rasm).

3-jadval. Turli ish rejimlarida tizimning energetik ko'rsatkichlari
Table 3. Energy performance indicators of the system under different operating modes.

Shamol tezligi, m/s	P_{mex} , W	P_{el} , W	T_e , N·m
8,5	1102	1000	25,9
6	643,3	583,7	21,4

Shamoldagi kinetik energiyadan foydali elektr energiyasigacha bo'lgan o'zgarish bir necha bosqichda, har birida ma'lum yo'qotishlar bilan kechadi. Nominal rejim misolida bu zanjir quyidagicha izohlanadi. Shamol oqimidagi to'liq quvvat (1) tenglama bo'yicha $P_{wind} = 2313$ W ni tashkil etadi. Turbina bu quvvatning faqat bir qismini - quvvat koeffitsiyenti C_p ulushini ajratib oladi, (2) tenglamadan haqiqiy quvvat koeffitsiyenti $C_p = P_{mex} / P_{wind} = 0,48$ ekanligi kelib chiqadi, bu Betz chegarasidan past bo'lgani uchun fizik jihatdan to'g'ri natijadir.

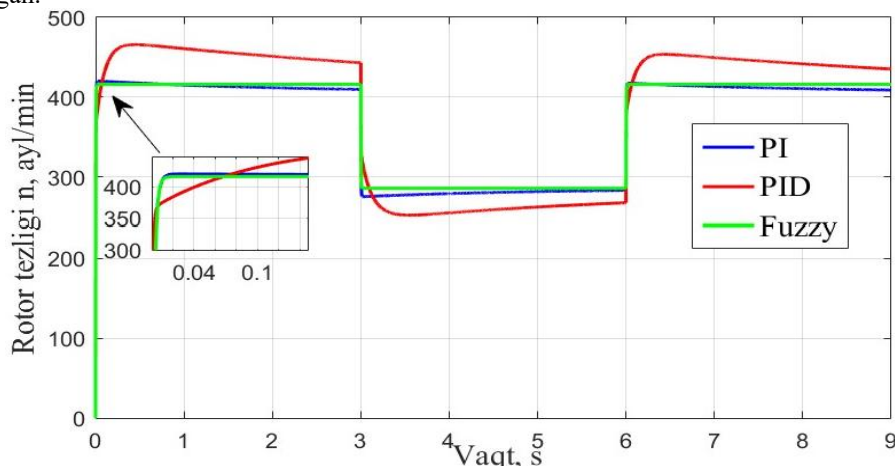


7-rasm. Tizimning turli ish rejimlaridagi mexanik va elektr quvvatlarining o'zgarish dinamikasi
Fig.7. Dynamics of mechanical and electrical power variation under different operating modes of the system

Regulyatorlarni qiyoslashda dinamik ko'rsatkichlar (rotor tezligi va moment) asosiy mezon sifatida olindi. Shamol turbinasining quvvati nazariy jihatdan shamol tezligining kubiga proporsionaldir $P \propto V^3$. Ushbu qonunga ko'ra, agar turbina qat'iy tezlikda ishlaganida, shamol 8,5 m/s dan 6 m/s ga kamayganda u etalon rotor tezligini 42,5 rad/s dan 30 rad/s gacha mutanosib kamaytirib, tezlik nisbatini $\lambda_{opt} = 7$ qiymatida va shu orqali C_p ni maksimal darajada saqlab qoladi.. Natijada turbina past

shamol sharoitida ham yuqori aerodinamik samaradorlikda ishlaydi va kub qonunidan kelib chiqadigan quvvat yo'qotishi qisman kamayadi. Bu MPPT boshqaruvining amaliy afzalligini bevosita tasdiqlaydi.

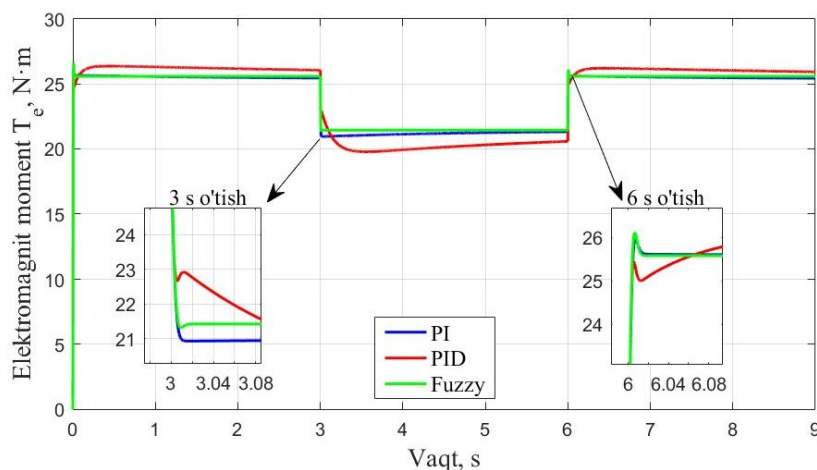
Uchala regulyatorning rotor tezligi 8-rasmda taqqoslangan. [8,5 6 8,5] m/s profiliga mos etalon tezlik 406 ayl/min (8,5 m/s) va 286 ayl/min (6 m/s) qiymatlari orasida pog'onali o'zgaradi. Boshlang'ich ko'tarilishda (kattalashtirilgan oyna) PID-regulyator eng tez ko'tarilsa-da, etalondan sezilarli oshib ketadi (467 ayl/min, 15%), PI (420 ayl/min) va Fuzzy (419 ayl/min) esa deyarli bir xil, ancha kichik oshib ketish bilan tez barqarorlashadi. Pog'ona nuqtalarida (3- va 6-soniya) ham shu ko'rsatilgan.



8-rasm. PI, PID, Fuzzy rotor tezligi taqqoslash grafigi

Fig.8. Comparison graph of rotor speed for PI, PID, and Fuzzy controllers

Elektromagnit moment javoblari 9-rasmda taqqoslangan. Shamol tezligi pog'onali bo'lganligi sababli moment ham pog'onali o'zgarib, yuqori rejimda $T_e = 25,9 \text{ N}\cdot\text{m}$, past rejimda esa $= 21,4 \text{ N}\cdot\text{m}$ qiymatni oladi. Barqaror holatda uchala regulyator ham bir-biriga yaqin moment beradi, chunki bu qiymat asosan turbina momenti va yuklama bilan belgilanadi. Farqlar esa shamol tezligi keskin o'zgargan pog'ona nuqtalarida yuzaga keladi va 9-rasmdagi kattalashtirilgan ichki oynalarda batafsil ko'rinadi.



9-rasm. PI, PID, Fuzzy moment taqqoslash grafigi

Fig.9. Comparison graph of torque for PI, PID, and Fuzzy controllers

3-soniyadagi o'tishda regulyatorlar ishlashi turlicha namoyon bo'ladi. PID-regulyator momentni keskin sakratib yuboradi (23 N·m gacha) va so'ngra yangi barqaror qiymatga sekin, qiya tarzda yaqinlashadi - bu uzoq o'tish jarayonini ko'rsatadi. PI-regulyator momentni eng past darajaga (21 N·m) tez tushiradi, Fuzzy regulyator esa oraliq, ammo eng silliq javobni (21,4 N·m) ta'minlaydi. 6-soniyadagi o'tishda ham shu manzara takrorlanadi: PID-regulyator avval pastga tushib (25,1 N·m), keyin barqaror qiymatga sekin qaytadi, PI va fuzzy regulyatorlar esa yangi qiymatga deyarli bir zumda va ortiqcha tebranishlarsiz o'rnashadi.

Shunday qilib, moment javobining silliqiligi va o'tish tezligi bo'yicha PI va fuzzy regulyatorlar PID-regulyatordan ustun keladi. Moment javobining silliqiligi amaliy jihatdan muhim ahamiyatga ega: keskin va cho'ziluvchi moment tebranishlari generator valida hamda mexanik uzatma qismlarida qo'shimcha dinamik kuchlanish xosil qiladi va tizimning xizmat muddatini qisqartirishiga sabab



bo'ladi. Shu nuqtai nazardan, o'tish nuqtalarida ortiqcha tebranish hosil qilmaydigan *fuzzy* regulyator tizimning mexanik ishonchliligini ta'minlash jihatidan ham eng maqbul yechim hisoblanadi.

Olingan natijalar mavjud tadqiqotlar xulosalariga mos keladi. [15, 18, 19] adabiyotlarda *fuzzy* regulyator klassik regulyatorlarga nisbatan shamol o'zgarishlariga bardoshliroq ekanini ko'rsatgan. Shu tariqa, mazkur tadqiqot natijalari xalqaro adabiyotdagi umumiy xulosa bilan izchil bo'lib, uni kichik quvvatli va past shamolli sharoit uchun kengaytiradi.

3. Xulosa (Conclusion)

Ushbu ishning asosiy maqsadi — doimiy magnitli sinxron generator (PMSG) asosidagi kichik quvvatli shamol energiyasini o'zgartirish tizimini MATLAB/Simulink muhitida modellashirish hamda MPPT boshqaruvi uchun PI, PID va Fuzzy mantiq regulyatorlarining samaradorligini qiyosiy tahlil qilishdan iborat. Tadqiqot ishida shamol turbinasining aerodinamik modeli va PMSG ning d-q koordinatalar tizimidagi matematik modeli ishlab chiqildi, MPPT bloki esa optimal tezlik nisbati usuli asosida qurildi. Uchala regulyator bir xil ish sharoitida sinovdan o'tkazildi: nominal rejimda tizimning foydali ish koeffitsiyenti 0,9074 ni tashkil etib, barcha regulyatorlar uchun barqaror holatda deyarli bir xil bo'lib chiqdi, biroq o'tkinchi jarayon ko'rsatkichlarida sezilarli farqlar aniqlandi. PID-regulyator tezroq javob berishiga qaramay eng katta oshib ketish (15%) va eng sekin o'rnatish vaqtini namoyon qildi, PI-regulyator oraliq natija ko'rsatdi, Fuzzy mantiq regulyatori esa eng kam oshib ketish (3%) va eng silliq rotor tezligi hamda moment javoblarini ta'minladi. Olingan natijalar mavjud xalqaro adabiyotlardagi xulosalar bilan izchil bo'lib, ularni kichik quvvatli va past shamol tezligiga ega sharoitlar uchun kengaytiradi. Shunday qilib, o'zgaruvchan va noturg'un shamol sharoitida PMSG asosidagi kichik quvvatli tizimlar uchun Fuzzy mantiqqa asoslangan MPPT boshqaruvi klassik PI va PID regulyatorlarga nisbatan ustunroq va istiqbolli yechim sifatida tavsiya etiladi.

ADABIYOT

1. Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2025. — London: GWEC, 2025. — URL: <https://www.gwec.net>.
2. Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2025. — London: GWEC, 2025. — URL: <https://www.gwec.net> [2] EcoWatch. Global Wind Energy Capacity Grew 117 GW in 2024. — URL: <https://www.ecowatch.com>.
3. IEA. Uzbekistan Energy Profile. — Paris: International Energy Agency, 2021. <https://www.iea.org/>.
4. Blaabjerg, F., Iov, F., Chen, Z., & Ma, K. (2010). Power Electronics and Controls for Wind Turbine Systems. In Proceedings of the IEEE Energy Conference and Exhibition, ENERGYCON 2010 (pp. 333-344). IEEE Press. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2010.5771701>.
5. Chatterjee, S., & Chatterjee, S. (2018). Review on the techno-commercial aspects of wind energy conversion system. IET Renewable Power Generation, 12(14), 1581–1608. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5197>.
6. Elngar A.E., Sabik A.S., Adel A.H., Nada A.S. Comparative Performance Evaluation of Wind Energy Systems Using Doubly Fed Induction Generator and Permanent Magnet Synchronous Generator // Wind. -2025. - Vol. 5, № 4. - P. 31. - DOI:10.3390/wind5040031 .
7. Comparative analysis of PMSG and DFIG performance in offshore wind energy systems. (2025). International Journal of Novel Research and Development. <https://ijnrd.org/papers/IJNRD2507211.pdf>.
8. Performance analysis of PMSG based wind power system. (2025). International Journal on Science and Technology (IJSAT). <https://www.ijsat.org/papers/2025/2/4055.pdf>.
9. Boulâam, K., & Boukhelifa, A. (2017). Pitch control of a wind energy conversion system based on permanent magnet synchronous generator (PMSG) [Conference paper]. <https://www.academia.edu/30856866>.
10. Modeling and control of grid connected variable speed PMSG based wind energy system. (2013). In Proceedings of CAC2S-13. Atlantis Press. <https://www.atlantispress.com/proceedings/cac2s-13/6292>.
11. Modelling and simulation of 2 MW PMSG wind energy conversion systems. (2014). Academia.edu. <https://www.academia.edu/7645215>.
12. Mueeen, S. M., Tamura, J., & Murata, T. (2007). Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration. In IEEE Power Engineering Society General Meeting. <https://doi.org/10.1109/PES.2007.4275748>.
13. Mali, S., James, S., & Tank, I. (2014). Improving low voltage ride-through capabilities for grid connected wind turbine generator. Energy Procedia, 54, 530–540. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.310>.



14. Chong, W. T., Fazlizan, A., Poh, S. C., et al. (2021). Wind turbine modelling and simulation using Matlab/SIMULINK. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1101(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1101/1/012034>.
15. J. Pande et al., "Ingenious technique to track the maximum power point for a wind energy system," IEEE Access, vol. 12, pp. 10160–10175, 2024.
16. A. Chand, Q. Khan, W. Alam, L. Khan, and J. Iqbal, "Certainty equivalence-based robust sliding mode control strategy and its application to uncertain PMSG-WECS," PLOS ONE, vol. 18, no. 2, p. e0281116, 2023, doi: 10.1371/journal.pone.0281116.
17. X. Ma, J. Yu, P. Yang, P. Wang, and P. Zhang, "An MPC based active and reactive power coordinated control strategy of PMSG wind turbines to enhance the support capability," Frontiers in Energy Research, vol. 11, p. 1159946, 2023, doi: 10.3389/fenrg.2023.1159946.
18. H. Bouregba, M. Hachemi, M. Bey, and A. Hamidat, "Stability analysis of the pitch angle control of large wind turbines using different controller strategies," Advances in Mechanical Engineering, vol. 14, no. 12, pp. 1–18, 2022, <https://doi.org/10.1177/16878132221139926>.
19. [1] E. Chavero-Navarrete, M. Trejo-Perea, J. C. Jáuregui-Correa, R. V. Carrillo-Serrano, and J. G. Ríos-Moreno, "Expert control systems for maximum power point tracking in a wind turbine with PMSG: State of the art," Applied Sciences, vol. 9, no. 12, p. 2469, 2019, <https://doi.org/10.3390/app9122469>.
20. X. C. Le, K. H. Le, and M. Q. Duong, "Model-free fast integral terminal sliding mode control for maximum power point tracking with high-order disturbance observer in WECSs," IEEE Access, vol. 14, 2026, doi: 10.1109/ACCESS.2026.3657194. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=11360993>.

REFERENCES

1. Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2025. — London: GWEC, 2025. — URL: <https://www.gwec.net>.
2. Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2025. — London: GWEC, 2025. — URL: <https://www.gwec.net>; EcoWatch. Global Wind Energy Capacity Grew 117 GW in 2024. — URL: <https://www.ecowatch.com>.
3. IEA. Uzbekistan Energy Profile. — Paris: International Energy Agency, 2021. <https://www.iea.org/>.
4. Blaabjerg, F., Iov, F., Chen, Z., & Ma, K. (2010). Power Electronics and Controls for Wind Turbine Systems. In Proceedings of the IEEE Energy Conference and Exhibition, ENERGYCON 2010 (pp. 333–344). IEEE Press. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2010.5771701>.
5. Chatterjee, S., & Chatterjee, S. (2018). Review on the techno-commercial aspects of wind energy conversion system. IET Renewable Power Generation, 12(14), 1581–1608. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5197>.
6. Elngar, A. E., Sabik, A. S., Adel, A. H., & Nada, A. S. Comparative Performance Evaluation of Wind Energy Systems Using Doubly Fed Induction Generator and Permanent Magnet Synchronous Generator. Wind, 5(4), 31. DOI:10.3390/wind5040031
7. Comparative analysis of PMSG and DFIG performance in offshore wind energy systems. (2025). International Journal of Novel Research and Development. <https://ijnrd.org/papers/IJNRD2507211.pdf>.
8. Performance analysis of PMSG based wind power system. (2025). International Journal on Science and Technology (IJSAT). <https://www.ijsat.org/papers/2025/2/4055.pdf>.
9. Boulâam, K., & Boukhelifa, A. (2017). Pitch control of a wind energy conversion system based on permanent magnet synchronous generator (PMSG) [Conference paper]. <https://www.academia.edu/30856866>.
10. Modeling and control of grid connected variable speed PMSG based wind energy system. (2013). In Proceedings of CAC2S-13. Atlantis Press. <https://www.atlantispress.com/proceedings/cac2s-13/6292>.
11. Modelling and simulation of 2 MW PMSG wind energy conversion systems. (2014). Academia.edu. <https://www.academia.edu/7645215>.
12. Muyeen, S. M., Tamura, J., & Murata, T. (2007). Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration. In IEEE Power Engineering Society General Meeting. <https://doi.org/10.1109/PES.2007.4275748>.
13. Mali, S., James, S., & Tank, I. (2014). Improving low voltage ride-through capabilities for grid connected wind turbine generator. Energy Procedia, 54, 530–540. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.310>.

14. Chong, W. T., Fazlizan, A., Poh, S. C., et al. (2021). Wind turbine modelling and simulation using Matlab/SIMULINK. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1101(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1101/1/012034>.
15. Pande, J., et al. (2024). Ingenious technique to track the maximum power point for a wind energy system. IEEE Access, 12, 10160–10175.
16. Chand, A., Khan, Q., Alam, W., Khan, L., & Iqbal, J. (2023). Certainty equivalence-based robust sliding mode control strategy and its application to uncertain PMSG-WECS. PLOS ONE, 18(2), e0281116. doi:10.1371/journal.pone.0281116
17. Ma, X., Yu, J., Yang, P., Wang, P., & Zhang, P. (2023). An MPC based active and reactive power coordinated control strategy of PMSG wind turbines to enhance the support capability. Frontiers in Energy Research, 11, 1159946. doi:10.3389/fenrg.2023.1159946
18. Bouregba, H., Hachemi, M., Bey, M., & Hamidat, A. (2022). Stability analysis of the pitch angle control of large wind turbines using different controller strategies. Advances in Mechanical Engineering, 14(12), 1–18. <https://doi.org/10.1177/16878132221139926>.
19. Chavero-Navarrete, E., Trejo-Perea, M., Jáuregui-Correa, J. C., Carrillo-Serrano, R. V., & Ríos-Moreno, J. G. (2019). Expert control systems for maximum power point tracking in a wind turbine with PMSG: State of the art. Applied Sciences, 9(12), 2469. <https://doi.org/10.3390/app9122469>.
20. Le, X. C., Le, K. H., & Duong, M. Q. (2026). Model-free fast integral terminal sliding mode control for maximum power point tracking with high-order disturbance observer in WECSs. IEEE Access, 14. doi:10.1109/ACCESS.2026.3657194.