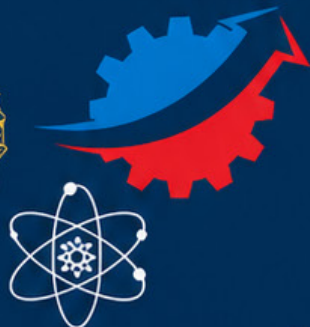


MUHANDISLIK

& IQTISODIYOT

ijtimoiy-iqtisodiy, innovatsion texnik,
fan va ta'limga oid ilmiy-amaliy jurnal

2026-YIL
SENTYABR / 9-SON, I-QISM



Milliy nashrlar

OAK: <https://oak.uz/pages/4802>

05.00.00 – Texnika fanlari

08.00.00 – Iqtisodiyot fanlar



Google
Scholar

ISSN
INTERNATIONAL
STANDARD
SERIAL
NUMBER
INTERNATIONAL CENTRE

OpenAIRE



ISSN: 3060-463X

РЭУ.РФ
РОССИЙСКИЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Г.В. ПЛЕХАНОВА
ФИЛИАЛ В Г. ТАШКЕНТЕ



muhandislik & iqtisodiyot

ijtimoiy-iqtisodiy, innovatsion texnik,
fan va ta'limga oid ilmiy-amaliy jurnal

Elektron nashr, 2026-yil, sentyabr.

Bosh muharrir:

Zokirova Nodira Kalandarovna, iqtisodiyot fanlari doktori, DSc, professor

Bosh muharrir o'rinbosari:

Shakarov Zafar G'afforovich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori, PhD, dotsent

Tahrir hay'ati:

Abduraxmanov Kalendar Xodjayevich, O'z FA akademigi, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Sharipov Kongratbay Avezimbetovich, texnika fanlari doktori, professor

Maxkamov Baxtiyor Shuxratovich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Abduraxmanova Gulnora Kalandarovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Shaumarov Said Sanatovich, texnika fanlari doktori, professor

Turayev Bahodir Xatamovich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Nasimov Dilmurod Abdulloyevich, iqtisodiyot fanlari doktori (DSc), professor

Allayeva Gulchexra Jalgasovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Arabov Nurali Uralovich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Maxmudov Odiljon Xolmirzayevich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Xamrayeva Sayyora Nasimovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Bobonazarova Jamila Xolmurodovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Irmatova Aziza Baxromovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Bo'taboyev Mahammadjon To'ychiyevich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Shamshiyeva Nargizaxon Nosirxuja kizi, iqtisodiyot fanlari doktori, professor,

Xolmuxamedov Muhsinjon Murodullayevich, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Xodjayeva Nodiraxon Abdurashidovna, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Amanov Otabek Amankulovich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

Toxirov Jaloliddin Ochil o'g'li, texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Qurbonov Samandar Pulatovich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Zikriyoyev Aziz Sadulloyevich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Tabayev Azamat Zaripbayevich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Sxay Lana Aleksandrovna, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

Ismoilova Gulnora Fayzullayevna, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Djumaniyazov Umrbek Ilxamovich, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Kasimova Nargiza Sabitdjanovna, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Kalanova Moxigul Baxritdinovna, dotsent

Ashurzoda Luiza Muxtarovna, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Sharipov Sardor Begmaxmat o'g'li, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Tursunov Ulug'bek Sativoldiyevich, iqtisodiyot fanlari doktori (DSc), dotsent

Bauyetdinov Majit Janizaqovich, Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti dotsenti, PhD

Botirov Bozorbek Musurmon o'g'li, Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Sultonov Shavkatjon Abdullayevich, Kimyo fanlari doktori, (DSc)

Jo'raeva Malohat Muhammadovna, filologiya fanlari doktori (DSc), professor.

Yusupov Maxamadamin Abduxamidovich, iqtisodiyot fanlari nomzodi (DSc), professor

Kalonova Moxigul Baxritdinovna, iqtisodiyot fanlari nomzodi (PhD), dotsent

Mirzayev Kulmamat Djanzakovich, iqtisodiyot fanlari nomzodi (DSc), professor.

Karimova Nilufar Sadirdin qizi, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Norboyev Odil Abrayevich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

Karimova Nilufar Sadirdin qizi, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Pardaev Umidjon Uralovich, iqtisodiyot fanlari doktori (DSc), professor

Xolmirzayev Ulug'bek Abdulazizovich, Iqtisodiyot fanlari doktori (DSc)

muhandislik & iqtisodiyot

ijtimoiy-iqtisodiy, innovatsion texnik,
fan va ta'limga oid ilmiy-amaliy jurnal

- 05.01.00 – Axborot texnologiyalari, boshqaruv va kompyuter grafikasi
- 05.01.01 – Muhandislik geometriyasi va kompyuter grafikasi. Audio va video texnologiyalari
- 05.01.02 – Tizimli tahlil, boshqaruv va axborotni qayta ishlash
- 05.01.03 – Informatikaning nazariy asoslari
- 05.01.04 – Hisoblash mashinalari, majmualari va kompyuter tarmoqlarining matematik va dasturiy ta'minoti
- 05.01.05 – Axborotlarni himoyalash usullari va tizimlari. Axborot xavfsizligi
- 05.01.06 – Hisoblash texnikasi va boshqaruv tizimlarining elementlari va qurilmalari
- 05.01.07 – Matematik modellash
- 05.01.11 – Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellekt
- 05.02.00 – Mashinasozlik va mashinashunoslik
- 05.02.08 – Yer usti majmualari va uchish apparatlari
- 05.03.02 – Metrologiya va metrologiya ta'minoti
- 05.04.01 – Telekommunikatsiya va kompyuter tizimlari, telekommunikatsiya tarmoqlari va qurilmalari. Axborotlarni taqsimlash
- 05.05.03 – Yorug'lik texnikasi. Maxsus yoritish texnologiyasi
- 05.05.05 – Issiqlik texnikasining nazariy asoslari
- 05.05.06 – Qayta tiklanadigan energiya turlari asosidagi energiya qurilmalari
- 05.06.01 – To'qimachilik va yengil sanoat ishlab chiqarishlari materialshunosligi
- 05.08.03 – Temir yo'l transportini ishlatish
- 05.08.06 – "G'ildirakli va gusenisali mashinalar va ularni ishlatish" (texnika fanlari)
- 05.09.01 – Qurilish konstruksiyalari, bino va inshootlar
- 05.09.04 – Suv ta'minoti. Kanalizatsiya. Suv havzalarini muhofazalovchi qurilish tizimlari
- 10.00.06 – Qiyosiy adabiyotshunoslik, chog'ishtirma tilshunoslik va tarjimashunoslik
- 10.00.04 – Yevropa, Amerika va Avstraliya xalqlari tili va adabiyoti
- 08.00.01 – Iqtisodiyot nazariyasi
- 08.00.02 – Makroiqtisodiyot
- 08.00.03 – Sanoat iqtisodiyoti
- 08.00.04 – Qishloq xo'jaligi iqtisodiyoti
- 08.00.05 – Xizmat ko'rsatish tarmoqlari iqtisodiyoti
- 08.00.06 – Ekonometrika va statistika
- 08.00.07 – Moliya, pul muomalasi va kredit
- 08.00.08 – Buxgalteriya hisobi, iqtisodiy tahlil va audit
- 08.00.09 – Jahon iqtisodiyoti
- 08.00.10 – Demografiya. Mehnat iqtisodiyoti
- 08.00.11 – Marketing
- 08.00.12 – Mintaqaviy iqtisodiyot
- 08.00.13 – Menejment
- 08.00.14 – Iqtisodiyotda axborot tizimlari va texnologiyalari
- 08.00.15 – Tadbirkorlik va kichik biznes iqtisodiyoti
- 08.00.16 – Raqamli iqtisodiyot va xalqaro raqamli integratsiya
- 08.00.17 – Turizm va mehmonxona faoliyati

Ma'lumot uchun, OAK
Rayosatining 2024-yil 28-avgustdagi 360/5-son qarori bilan "Dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro'yxati"ga texnika va iqtisodiyot fanlari bo'yicha "Muhandislik va iqtisodiyot" jurnali ro'yxatga kiritilgan.

Muassis: "Tadbirkor va ishbilarmon" MChJ

Hamkorlarimiz:

1. Toshkent shahridagi G.V.Plexanov nomidagi Rossiya iqtisodiyot universiteti
2. Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti
3. Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti" milliy tadqiqot universiteti
4. Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti
5. Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti
6. Toshkent davlat transport universiteti
7. Toshkent arxitektura-qurilish universiteti
8. Toshkent kimyo-texnologiya universiteti
9. Jizzax politexnika instituti



MUNDARIJA

ASOSIY VOSITALARNING DASTLABKI QIYMATINI SHAKLLANTIRISHNING XALQARO STANDARTLAR ASOSIDAGI METODIKASINI TAKOMILLASHTIRISH.....	9
Nematova Dilnoza Azamatovna	
TIJORAT BANKLARIDA MIJOZGA YO'NALTIRILGAN BIZNES-JARAYONLARINI TRANSFORMATSIYA QILISHNING HOZIRGI HOLATI.....	15
Erdonayev Aliqul Xalimovich	
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГОСТИНИЧНЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ НА ОСНОВЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ В УЗБЕКИСТАНЕ	23
Нигматова Сугдиена Жалолиддин кизи	
SANOAT KORXONALARINING RAQOBATBARDOSHLIGINI OSHIRISHDA ZAMONAVIY MARKETING MEKANIZMLARIDAN FOYDALANISH.....	29
Bazarova Mamlakat Supiyevna	
XORIJIY ILMIY STAJIROVKALARNI TASHKIL ETISH JARAYONLARINI RAQAMLASHTIRISHNING TIZIMLI TAHLILI VA KONSEPTUAL MODELI	33
Tojiyev S.A., Mashg'ulotov J.A., Usmonov U.M.	
HUDUDLAR IQTISODIYOTIDAGI NOMUTANOSIBLIK LARNI BARTARAF ETISHNING INSTITUTSIONAL VA IQTISODIY MEKANIZMLARI.....	44
Toshov Mirzabek Hakimovich	
O'ZBEKISTONDA YENGIL SANOAT KORXONALARINING EKSPORT SALOHİYATINI OSHIRISH	50
O'rinova Umida Qodirjonovna	
QISHLOQ XO'JALIGIDA ULTRABINAFSHA C NURLANISH TEXNOLOGIYALARINING QO'LLANILISHI: ZAMONAVIY HOLATI, SAMARADORLIGI VA RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI	54
Ibroximov Sanjarbek, Nematov Nurillo, Xakimov Dilmurod	
TEXNOGEN CHIQINDILAR ASOSIDA MNA-1 VA MNA-2 FAOL KIMYOVIIY QO'SHIMCHALARINI SINTEZ QILISH VA SEMENT XAMIRINING REOLOGIK KO'RSATKICHLARINI BOSHQARISH.....	64
Muhamedov Nodir Abdug'aniyevich	
IKKI TOMONLAMA TA'MINLANADIGAN ASINXRON GENERATOR ASOSIDAGI SHAMOL ENERGETIKA TIZIMINI MATEMATIK MODELLASHTIRISH VA VEKTORLI BOSHQARISHNI TADQIQ ETISH.....	69
To'ychiyev Furqat, Rashidov Nuralibek, Abduxalilov Abdumannop	



IKKI TOMONLAMA TA'MINLANADIGAN ASINXRON GENERATOR ASOSIDAGI SHAMOL ENERGETIKA TIZIMINI MATEMATIK MODELLASHTIRISH VA VEKTORLI BOSHQARISHNI TADQIQ ETISH

To'ychiyev Furqat Numonovich

Toshkent davlat texnika universiteti dotsenti, PhD.

E-mail: tuychievfn@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1031-3460

Rashidov Nuralibek Xayruddinovich

Toshkent davlat texnika universiteti doktranti

E-mail: nuralibekrashidov@gmail.com

ORCID: 0009-0001-5003-6664

Abduxalilov Abdumannop G'ayratjon o'g'li

Toshkent davlat texnika universiteti doktranti

E-mail: abduxalilovabdumannon50@gmail.com

ORCID: 0009-0008-2179-124X

Annotatsiya. Maqolada nominal quvvati 2 MW bo'lgan ikki tomonlama ta'minlanadigan asinxron generator (ITTAG) asosidagi tarmoqqa ulangan shamol energetika tizimini matematik modellashtirish, boshqarish va dinamik xususiyatlarini tadqiq etish masalalari ko'rib chiqilgan. Tadqiqotning asosiy maqsadi shamol tezligi o'zgarganda shamol oqimining kinetik energiyasini elektr energiyasiga samarali o'zgartirishni ta'minlaydigan o'zgaruvchan aylanish tezligiga ega shamol energetika qurilmasining modelini ishlab chiqish va tahlil qilishdan iborat. Tadqiqot uchun shamol turbinasining aerodinamik qismi va ITTAG elektr mashinasining tizimdagi elektromagnit hamda mexanik jarayonlarni hisobga oluvchi matematik model ishlab chiqilgan. Taklif etilgan tizimni modellashtirish va tadqiq etish MATLAB/Simulink dasturiy muhitida amalga oshirilgan. Tizim samaradorligini tahlil qilish uchun shamol tezligining 7–12 m/s oralig'ida o'zgarish rejimi ko'rib chiqilgan. Modellashtirish natijalari rotor aylanish tezligining shamol tezligi o'zgarishiga mos ravishda barqaror o'zgarishini, shuningdek, stator va rotor toklarining barqaror hamda sinusoidal shaklga yaqinligini ko'rsatdi. Shamol tezligi 12 m/s bo'lganda stator toki amplitudasi taxminan ± 2411 A, effektiv (ta'sir etuvchi) qiymati 1705 A ga erishgan. Elektr energiyasi sifatini tahlil qilish stator toki umumiy garmonik buzilishlar koeffitsiyenti (THD) 0,68 % ekanligini ko'rsatdi. Olingan natijalar shamol tezligining berilgan diapazonida tizimning barqaror ishlashini va stator toki garmonik buzilishlarining past darajasini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: ikki tomonlama ta'minlanadigan asinxron generator, shamol turbinasi, shamol energetika tizimi, MATLAB/Simulink, matematik modellashtirish, vektorli boshqaruv, rotor tomonidagi o'zgartirgich, tarmoq tomonidagi o'zgartirgich.

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы математического моделирования, управления и исследования динамических характеристик подключённой к сети ветроэнергетической системы на основе асинхронного генератора двойного питания (АДГДП) номинальной мощностью 2 MW. Основная цель исследования заключается в разработке и анализе модели ветроэнергетической установки с переменной скоростью вращения, обеспечивающей эффективное преобразование кинетической энергии ветрового потока в электрическую энергию при изменении скорости ветра. Для исследования разработана математическая модель аэродинамической части ветровой турбины и электрической машины АДГДП, учитывающая электромагнитные и механические процессы в системе. Моделирование и исследование предложенной системы выполнены в программной среде MATLAB/Simulink. Для анализа эффективности системы рассмотрен режим изменения скорости ветра в диапазоне 7–12 м/с. Результаты моделирования показали устойчивое изменение скорости вращения ротора в соответствии с изменением скорости ветра, а также устойчивость токов статора и ротора и их близкую к синусоидальной форму. При скорости ветра 12 м/с амплитуда тока статора достигла примерно ± 2411 А, а эффективное значение составило 1705 А. Анализ качества электрической энергии показал, что коэффициент общих гармонических искажений

(THD) тока статора составляет 0,68 %. Полученные результаты свидетельствуют об устойчивой работе системы в заданном диапазоне скорости ветра и низком уровне гармонических искажений тока статора.

Ключевые слова: асинхронный генератор двойного питания, ветровая турбина, ветроэнергетическая система, MATLAB/Simulink, математическое моделирование, векторное управление, преобразователь со стороны ротора, преобразователь со стороны сети.

Abstract. The article considers the mathematical modeling, control, and dynamic characteristics of a grid-connected wind energy system based on a doubly fed induction generator (DFIG) with a rated power of 2 MW. The main objective of the study is to develop and analyze a model of a variable-speed wind energy conversion system that ensures efficient conversion of the kinetic energy of the wind flow into electrical energy under varying wind speed conditions. A mathematical model of the aerodynamic part of the wind turbine and the DFIG electrical machine was developed, taking into account the electromagnetic and mechanical processes in the system. The proposed system was modeled and investigated in the MATLAB/Simulink software environment. To analyze the system efficiency, a wind speed variation regime in the range of 7–12 m/s was considered. The simulation results demonstrated a stable variation in rotor speed in response to changes in wind speed, as well as stable stator and rotor currents with waveforms close to sinusoidal. At a wind speed of 12 m/s, the stator current amplitude reached approximately ± 2411 A, while its RMS (effective) value reached 1705 A. The analysis of electrical energy quality showed that the total harmonic distortion (THD) of the stator current was 0.68%. The obtained results demonstrate stable system operation within the specified wind speed range and a low level of harmonic distortion in the stator current.

Keywords: doubly fed induction generator, wind turbine, wind energy system, MATLAB/Simulink, mathematical modeling, vector control, rotor-side converter, grid-side converter.

KIRISH

Energiya jamiyatning texnologik va ijtimoiy-iqtisodiy rivojlanishini ta'minlovchi muhim omillardan biridir. Sanoat va ishlab chiqarishning rivojlanishi natijasida elektr energiyasiga bo'lgan talab tobora ortib bormoqda. Shu sababli ishonchli energiya ta'minotini ta'minlash bilan bir qatorda, an'anaviy energiya manbalariga qaramlikni kamaytirish ham dolzarb masalaga aylanmoqda. Qazilma yoqilg'i zaxiralarining cheklanganligi va ekologik muammolar qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanishni kengaytirishni talab etmoqda. Ayniqsa, shamol va quyosh energetikasi ekologik toza elektr energiyasi ishlab chiqarishning istiqbolli yo'nalishlari hisoblanadi [1, 2]. Shu bois shamol energetika qurilmalarining samaradorligini oshirish va ularni takomillashtirish zamonaviy energetikaning dolzarb vazifalaridan biridir.

Shamol energetikasi qayta tiklanuvchi energiya manbalari orasida muhim o'rin egallaydi. U elektr energiyasi ishlab chiqarishda atrof-muhitga zararli ta'sirni kamaytirish imkonini beruvchi ekologik toza energiya manbalaridan biridir [3]. Hozirgi vaqtda shamol energetikasi jahon energetikasining eng jadal rivojlanayotgan yo'nalishlaridan biri hisoblanadi. GWEC ma'lumotlariga ko'ra, 2025-yilda dunyoda 165 GW yangi shamol energetikasi quvvatlari ishga tushirilgan va yil yakuniga kelib jahon bo'yicha umumiy o'rnatilgan quvvat 1299 GW ga yetgan [4]. Ushbu ko'rsatkichlar shamol energiyasidan foydalanish ko'лами kengayib borayotganini hamda uning zamonaviy energetika tizimidagi ahamiyati tobora ortayotganini ko'rsatadi.

MAVZUGA OID ADABIYOTLAR SHARHI

1990-yillarning o'rtalarigacha shamol energetika qurilmalarida asosan elektr tarmog'iga bevosita ulangan, doimiy aylanish tezligida ishlaydigan qisqa tutashgan rotorli asinxron generatorlar qo'llanilgan. Ushbu tizimda generator elektr tarmog'iga bevosita ulangan va aylanish tezligini rostlash diapazonining juda cheklanganligi bo'lib, nominal rejimda sirpanish odatda 2% atrofida bo'ladi. Bundan tashqari, asinxron generatorni ishga tushish toki nominal tokdan 6–8 marta yuqori bo'lishi mumkin. Shu bilan birga, shamol tezligi o'zgarganda maksimal quvvatni olish va turbinani optimal ishlash nuqtasida ushlab turish imkoniyati past bo'ladi. Faza rotorli asinxron generator tizimida rotor zanjiriga tashqi qarshilik ulangan. Tezlikni taxminan $\pm 10\%$ diapazonda rostlash mumkin, ammo rotorda qo'shimcha quvvat isroflari yuzaga keladi. Kuch elektronikasi va avtomatik boshqaruv tizimlarining rivojlanishi o'zgaruvchan aylanish tezligida ishlaydigan shamol energetika qurilmalarini joriy etish imkonini berdi. Sinxron (doimiy magnitli) generatorlar tizimida esa generator tarmoqqa to'liq quvvatli o'zgartirgich orqali ulanib, tezlikni keng diapazonda boshqarish imkoni yaratiladi, biroq o'zgartirgich generatorning 100% nominal quvvatiga mos tanlanadi. Ikki tomonlama ta'minlanadigan asinxron generator (ITTAG) tizimida tezlikni taxminan $\pm 30\%$ diapazonda boshqarish mumkin va o'zgartirgich quvvati generator nominal quvvatining 25–35% ni tashkil etadi [5–7].

ITTAG asosidagi shamol energetika qurilmasi odatda shamol turbinasi, faza rotorli asinxron generator, chastota o'zgartirgich, boshqaruv tizimi va elektr tarmog'idan tashkil topadi. Generator statori bevosita tarmoqqa



ulanadi, rotor esa o'zgaras tok zanjiri orqali o'zaro bog'langan ikkita kuch o'zgartirgichdan iborat ikki tomonlama yo'nalishli o'zgartirgich orqali tarmoqqa ulanadi. Bunday tuzilish generatorning aktiv va reaktiv quvvatlarini mustaqil rostdash, shuningdek, rotor zanjiridagi quvvat oqimining chastotasi va yo'nalishini o'zgartirish imkonini beradi [8–10]. Generator sinxron tezlikdan past tezlikda ishlaganda elektr quvvatining bir qismi o'zgartirgich orqali tarmoqdan rotorga uzatiladi. Sinxron tezlikdan yuqori tezlikda ishlaganda quvvat oqimining yo'nalishi o'zgaradi va rotor zanjiridagi energiya elektr tarmog'iga uzatiladi. Bunda ishlab chiqarilgan quvvatning asosiy qismi stator orqali tarmoqqa uzatiladi, rotor o'zgartirgichi orqali o'tadigan quvvat esa generator nominal quvvatining faqat bir qismini tashkil etadi [11].

Rotor zanjirida o'zgartirgichdan foydalanish generatorning aylanish tezligini sinxron tezlikka nisbatan rostdash va shamol tezligining keng diapazonida shamol energetika qurilmasining ishlashini ta'minlash imkonini beradi. Bu shamol oqimining kinetik energiyasidan samaraliroq foydalanish, maksimal quvvat nuqtasini kuzatish (MPPT) algoritmlarini amalga oshirish, mexanik yuklamalarni kamaytirish va qurilmaning energetik samaradorligini oshirish imkonini beradi [12–14].

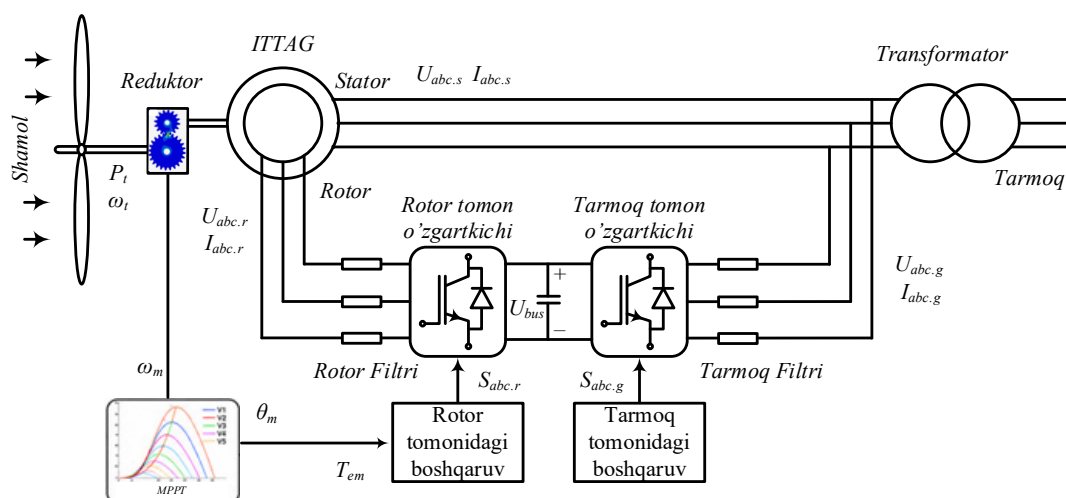
Ko'plab tadqiqotlar mavjudligiga qaramay, aerodinamik qism, ITTAG va ikki konturli vektorli boshqaruv tizimini kompleks modellashtirish hamda shamol tezligining pog'onali o'zgarishida dinamik xususiyatlarni baholash masalalari dolzarbligicha qolmoqda. Ushbu ishning maqsadi shamol tezligi o'zgarganda ITTAG asosidagi 2 MW quvvatli shamol energetika tizimining matematik modelini ishlab chiqish va vektorli boshqaruvini tadqiq etishdan iborat.

TADQIQOT METODOLOGIYASI

Shamol energetika qurilmasining tuzilishi va matematik modellashtirish. ITTAG asosidagi tarmoqqa ulangan shamol energetika tizimining strukturaviy sxemasi 1-rasmda keltirilgan. Tizim asosiy elementlardan: shamol turbinasi, ITTAG, rotor tomonidagi filtr, tarmoq tomonidagi filtr, maksimal quvvat nuqtasini kuzatish (MPPT) kontrolleri, o'zgaras tok zanjiri kondensatori, shuningdek, impuls-kenglik modulyatsiyasi (IKM) asosidagi ikkita uch fazali kuchlanish o'zgartirgichi va tegishli boshqaruv tizimlaridan tashkil topgan. Rotor chulg'amiga rotor filtri orqali ulangan o'zgartirgich rotor tomonidagi o'zgartirgich (RSC) hisoblanadi. Generator stator chulg'ami bevosita elektr tarmog'iga ulangan, tarmoqqa filtr orqali ulangan ikkinchi o'zgartirgich esa tarmoq tomonidagi o'zgartirgich (GSC) vazifasini bajaradi. Rotor va tarmoq tomonidagi o'zgartirgichlar ITTAG ning asosiy ish rejimlarini boshqarish, aktiv va reaktiv quvvat oqimlarini rostdash hamda o'zgaras tok zanjiridagi talab etilgan kuchlanishni ushlab turishni ta'minlaydi.

TAHLIL VA NATIJALAR

Shamol turbinasining modeli. Shamol turbinasi shamol oqimining kinetik energiyasini aylanishning mexanik energiyasiga aylantirish uchun mo'ljallangan qurilmadir. Turbinaning asosiy vazifasi harakatlanayotgan havoning energiyasini generator valiga uzatiladigan mexanik aylantiruvchi momentga aylantirishdan iborat. Shamol oqimi ta'sirida parraklar aylana boshlaydi va shamol rotoridan elektr mashinasiga mexanik quvvat uzatilishini ta'minlaydi (1-rasm).



1-rasm. ITTAG asosidagi shamol energetika qurilmasining strukturaviy sxemasi

Muayyan shamol tezligida shamol oqimida mavjud bo'lgan quvvat havo zichligi, parraklar egallagan maydon va shamol oqimi tezligiga bog'liq. Shamol oqimining nazariy quvvati quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A V_v^3 \quad (1)$$

bu yerda:

A -turbina parraklari egallagan maydon,

m^2 ; ρ -havo zichligi, kg/m^3 (standart sharoitlarda odatda $1,225 kg/m^3$ ga teng);

V_v -shamol tezligi, m/s .

Yuqoridagi (1) tenglama shamol oqimida mavjud bo'lgan umumiy quvvatni ifodalaydi, biroq real shamol energetika qurilmasida aerodinamik va konstruktiv isroflar sababli ushbu quvvatning barchasini mexanik energiyaga aylantirish mumkin emas. Shuning uchun shamol turbinasi tomonidan havo oqimidan olinadigan haqiqiy mexanik quvvat quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2)$$

bu yerda:

R -turbina rotorining radiusi, m ;

$C_p(\lambda, \beta)$ -shamol energiyasidan foydalanish koeffitsiyenti (quvvat koeffitsiyenti);

λ -turbina tezlik koeffitsiyenti bo'lib, parrak uchining chiziqli tezligining shamol tezligiga nisbatini ifodalaydi;

β -parrakning burilish burchagi.

$C_p(\lambda, \beta)$ quvvat koeffitsiyenti shamol turbinasining aerodinamik samaradorligini ifodalaydi va λ tezlik koeffitsiyenti hamda β parrak o'rnatilish burchagiga bog'liq.

Ko'rib chiqilayotgan modelda ushbu koeffitsiyent quyidagi ifodalar bilan aniqlanadi:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \beta^{c_5} - c_6 \right) e^{-\frac{c_7}{\lambda_i}} \quad (3)$$

bu yerda doimiy koeffitsiyentlarning qiymatlari quyidagicha qabul qilingan: $c_1=0,73$; $c_2=151$; $c_3=0,58$; $c_4=0,002$; $c_5=2,4$; $c_6=13,2$; $c_7=18,4$.

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.02\beta} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

Shamol oqimi energiyasini o'zgartirishning nazariy chegarasi Betz qonuni bilan aniqlanadi. Ushbu chegaraga ko'ra quvvat koeffitsiyentining maksimal qiymati 59,3 % ni tashkil etadi. Real sharoitlarda C_p qiymati nazariy chegaradan past bo'ladi va turbina konstruksiyasi hamda uning ish rejimiga bog'liq.

Shamol turbinasining ish rejimini tavsiflovchi muhim parametr tezlik koeffitsiyenti bo'lib, u parrak uchining chiziqli tezligining shamol tezligiga nisbati sifatida aniqlanadi:

$$\lambda = \frac{R \omega_t}{V_v} \quad (5)$$

bu yerda:

ω_t - shamol turbinasi rotorining aylanish burchak tezligi, rad/s .

Shamol turbinasi tomonidan hosil qilinadigan mexanik aylantiruvchi moment uning mexanik quvvati va aylanish burchak tezligi orqali aniqlanadi:

$$T_t = \frac{P_t}{\omega_t} \quad (6)$$

Shamol turbinasining matematik modeli shamol tezligi, aylanish burchak tezligi, quvvat koeffitsiyenti va mexanik moment o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni aniqlash imkonini beradi.

ITTAGning matematik modeli

ITTAG stator va rotor chulg'amlaridan hamda kontakt halqalaridan tashkil topadi. Statorning uch fazali chulg'ami bevosita elektr tarmog'iga ulangan. Rotorning uch fazali chulg'ami kontakt halqalari orqali rotor tomonidagi o'zgartirgichga ulanadi. Bunday konstruksiya generatorning ish rejimiga qarab rotor chulg'amiga boshqaruv tokini berish yoki undan elektr energiyasini olish imkonini beradi [15].

ITTAGning dinamik modelini qurishda to'g'ri va teskari koordinata almashtirishlardan foydalaniladi. Fazoviy



vektorlar nazariyasi asosida stator va rotorning uch fazali chulg'amlarini ekvivalent ikki fazali koordinatalar tizimlari ko'rinishida ifodalanishi mumkin. Boshqaruv tizimida stator oqim vektori bo'yicha yo'naltirilgan sinxron aylanuvchi dq koordinatalar tizimidan foydalaniladi.

Tegishli koordinata tizimlarida stator va rotor kuchlanish vektorlari quyidagicha aniqlanadi:

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs}; \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds}; \end{cases} \begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_r \psi_{qr}; \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_r \psi_{dr}. \end{cases} \quad (7)$$

bu yerda:

$u_{ds}, u_{qs}, u_{dr}, u_{qr}$ - mos ravishda stator va rotor kuchlanishlarining d va q o'qlari bo'yicha tashkil etuvchilari;

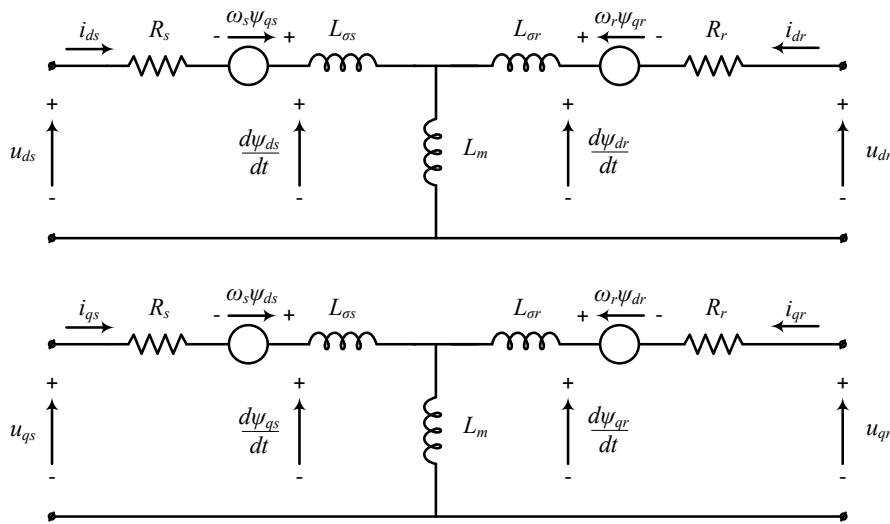
$i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$ - mos ravishda stator va rotor toklarining d va q o'qlari bo'yicha tashkil etuvchilari;

$\psi_{ds}, \psi_{qs}, \psi_{dr}, \psi_{qr}$ - mos ravishda stator va rotor oqim ilashuvlarining d va q o'qlari bo'yicha tashkil etuvchilari

R_s, R_r - stator va rotor chulg'amlarining faza qarshiliklari;

ω_s, ω_r - mos ravishda stator va rotor magnit maydonlarining burchak tezliklari.

(7) tenglama asosida ITTAGning dq koordinatalar tizimidagi almashtirish sxemasi 2-rasmda keltirilgan (2-rasm).



2-rasm. ITTAGning dq koordinatalar tizimidagi almashtirish sxemasi

Stator va rotor magnit oqim vektorlari quyidagicha ifodalanadi:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}; \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}; \end{cases} \begin{cases} \psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr}; \\ \psi_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr}. \end{cases} \quad (8)$$

bu yerda:

ψ_s, ψ_r - mos ravishda stator va rotor oqim ilashuv vektorlari;

ψ_{ds}, ψ_{qs} - stator oqim ilashuvining dq o'qlari bo'yicha tashkil etuvchilari;

ψ_{dr}, ψ_{qr} - rotor oqim ilashuvining dq o'qlari bo'yicha tashkil etuvchilari;

L_s, L_r - mos ravishda stator va rotor faza chulg'amlarining sochilish induktivliklari;

L_m - stator va rotor orasidagi o'zaro induktivlik;

p - generator qutblar juftlari soni.

Generatorning elektromagnit momenti quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} (\psi_{qs} i_{dr} - \psi_{ds} i_{qr}) \quad (9)$$

Stator va rotorning aktiv hamda reaktiv quvvatlari mos ravishda quyidagi tenglamalar bilan aniqlanadi:

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs}); \\ Q_s = \frac{3}{2} (u_{qs} i_{ds} - u_{ds} i_{qs}); \end{cases} \begin{cases} P_r = \frac{3}{2} (u_{dr} i_{dr} + u_{qr} i_{qr}); \\ Q_r = \frac{3}{2} (u_{qr} i_{dr} - u_{dr} i_{qr}). \end{cases} \quad (10)$$

bu yerda:

P_s, Q_s - mos ravishda statorning aktiv va reaktiv quvvatlari;

P_r, Q_r - rotorning aktiv va reaktiv quvvatlari;

T_{em} - elektromagnit moment.

Rotorning elektromagnit va yuklama momentlari ta'siridagi dinamikasini aniqlovchi mexanik harakatning asosiy tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega:

$$j \frac{d\omega_m}{dt} = T_{em} - T_{load} \quad (11)$$

bu yerda:

J - rotorning inertsia momenti;

T_{load} - rotor valiga ta'sir qiluvchi yuklama momenti;

ω_m - rotorning mexanik aylanish burchak tezligi.

ITTAG statori uch fazali elektr tarmog'iga bevosita ulanganligi sababli uning kuchlanishi va chastotasi tarmoq parametrlariga bog'liq. Rotor kuchlanishi va toki esa rotor tomonidagi o'zgartirgich (RSC) orqali rostlanib, elektromagnit moment, aktiv va reaktiv quvvatni boshqarish imkonini beradi. Bunda dq koordinatalar tizimida vektorli boshqaruv qo'llaniladi va stator oqimiga yo'naltirilgan koordinatalar tizimi qabul qilinadi. Tarmoq tomonidagi o'zgartirgich (GSC) o'zgarmas tok zanjiri kuchlanishini barqaror ushlab, tarmoq bilan aktiv va reaktiv quvvat almashinuvini boshqaradi. RSC va GSCning birgalikdagi ishlashi shamol tezligi o'zgarishida ITTAGning barqaror va samarali ishlashini ta'minlaydi.

(8)-ifodalarni (7)-tenglamaga qo'yib va ($\psi_{qs}=0$) deb qabul qilib, rotor kuchlanishlarining dq koordinatalar tizimidagi quyidagi tenglamalari olinadi:

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d\bar{\psi}_s}{dt}; \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} + \omega_r \sigma L_r i_{dr} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} \frac{d\bar{\psi}_s}{dt}. \end{cases} \quad (12)$$

bu yerda . Tarmoq kuchlanishining chastotasi va amplitudasi doimiy bo'lgan barqaror rejimda stator oqim ilashuvining vaqt bo'yicha o'zgarishi juda kichik bo'ladi, shuning uchun $d\bar{\psi}/dt \approx 0$. Barqaror ish rejimida va statorning aktiv qarshiligidagi kuchlanish tushuvi nisbatan kichik bo'lganda stator oqim ilashuvini amalda doimiy deb hisoblash mumkin. Bunday holda (12)-tenglamadan rotor tokining dq o'qlari bo'yicha tashkil etuvchilarini tegishli rostlagichlar yordamida boshqarish mumkin.

ITTAG asosidagi shamol energetika tizimlarida tarmoq boshqaruv konturi elektr energiyasini tarmoqqa samarali uzatish va qurilmaning barqaror ishlashini ta'minlashda muhim rol o'ynaydi. Tarmoq tomonidagi o'zgartirgich rotor tomonidagi o'zgartirgich bilan birgalikda ishlaydi va u bilan o'zgarmas tok zanjiri orqali bog'langan. Tarmoq tomonidagi o'zgartirgichni boshqarish uchun, odatda, dq koordinatalar tizimida vektorli boshqaruv qo'llaniladi. dq koordinatalar tizimi elektr tarmog'i kuchlanish vektori bo'yicha yo'naltiriladi. Bunda uch fazali (abc) kattaliklar avval ikki fazali qo'zg'almas ($\alpha\beta$) koordinatalar tizimiga, so'ngra aylanuvchi (dq) koordinatalar tizimiga o'zgartiriladi.

Tarmoq filtri chiqishidagi kuchlanishning dq-koordinatalar tizimidagi tashkil etuvchilari, shuningdek, o'zgartirgich va tarmoq o'rtasida uzatiladigan aktiv hamda reaktiv quvvatlar quyidagi ifodalar orqali aniqlanadi.

$$\begin{cases} u_{df} = R_f i_{df} + L_f \frac{di_{df}}{dt} + u_{dg} - \omega_s L_f i_{qg}; \\ u_{qf} = R_f i_{qg} + L_f \frac{di_{qg}}{dt} + \omega_s L_f i_{dg}. \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} (u_{dg} i_{dg} + u_{qg} i_{qg}) \Rightarrow P_g = \frac{3}{2} u_{dg} i_{dg}; \\ Q_g = \frac{3}{2} (u_{qg} i_{dg} - u_{dg} i_{qg}) \Rightarrow Q_g = -\frac{3}{2} u_{dg} i_{qg}. \end{cases} \quad (14)$$

(14)-tenglamaga ko'ra, d o'qi bo'yicha i_{dg} tok tashkil etuvchisi elektr tarmog'iga uzatiladigan P_g aktiv quvvat miqdorini belgilaydi va shu sababli aktiv quvvat oqimini rostlashda foydalaniladi. O'z navbatida, q o'qi bo'yicha i_{qg} tok tashkil etuvchisi Q_g reaktiv quvvatni rostlash uchun xizmat qiladi. Bunday ajratish tarmoq tomonidagi o'zgartirgichning aktiv va reaktiv quvvatlarini mustaqil boshqarish imkonini beradi, bu esa elektr tarmog'ining talab etilgan parametrlarini ushlab turish va shamol energetika tizimining barqaror ishlashiga yordam beradi.

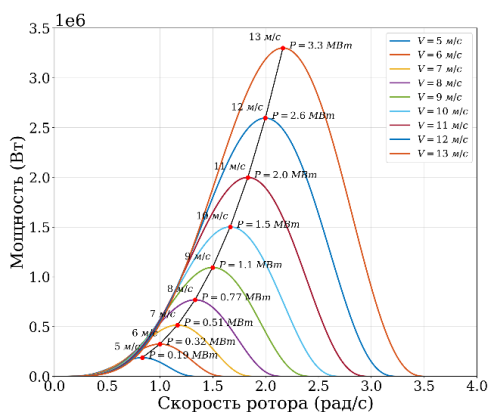


Taklif etilgan ITTAGning matematik modeli, shuningdek rotor va tarmoq tomonidagi o'zgartirgichlardan foydalanilgan boshqaruv tizimi MATLAB/Simulink muhitida amalga oshirildi va tadqiq etildi. Ushbu bo'limda ishlab chiqilgan shamol energetika tizimining shamol tezligi o'zgargandagi ish samaradorligi tahlil qilinadi. Modellashirishda foydalanilgan asosiy parametrlar 1-jadvalda keltirilgan (1-jadval).

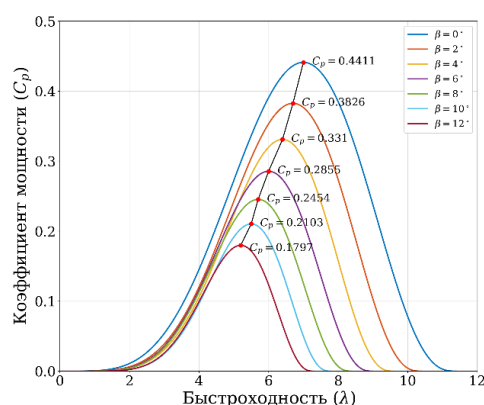
1-jadval
Modelning asosiy parametrlari

Parametr	Qiymat	Parametr	Qiymat
Nominal shamol tezligi	11 m/s	Aylanish chastotasi diapazoni	9–18 ayl/min
Havo zichligi	1,225 kg/m ³	Nominal moment	12732 N·m
Tezlik koeffitsiyenti (λ)	7,2	Qutblar juftlari soni	2
Parraklarning burilish burchagi (β)	0°	Stator kuchlanishi	690 V
Maksimal quvvat koeffitsiyenti	0,44	Reduktor uzatish nisbati	100
Nominal quvvat	2 MW	Turbina radiusi	42 m

Ko'rib chiqilayotgan tadqiqotda parraklarning burilish burchagi β ning qiymati 0° ga teng deb qabul qilingan, asosiy hisob-kitoblar esa nominal shamol tezligi 11 m/s uchun bajarilgan. 3-rasmda $\beta=0^\circ$ bo'lganda turli shamol tezliklarida shamol turbinasining chiqish quvvati hisoblangan xarakteristikalar keltirilgan. Turli parraklarning burilish burchagi β qiymatlarida C_p quvvat koeffitsiyentining λ tezlik koeffitsiyentiga bog'liqligi 4-rasmda keltirilgan. Modellashirish natijalari tadqiq qilinayotgan turbina quvvat koeffitsiyentining maksimal qiymati $C_{p,max}=0,44$ ekanligini va u $\lambda=7,2$ optimal tezlik koeffitsiyenti qiymatida hosil bo'lishini ko'rsatdi. Olingan $C_{p,max}$ va λ qiymatlari turbina ish rejimining optimal parametrlari bo'lib, shamol oqimining mavjud energiyasidan maksimal samaradorlik bilan foydalanishni ta'minlaydi. Tezlik koeffitsiyentini optimal qiymatga yaqin ushlab turish shamol tezligi o'zgarganda shamol energetika tizimiga maksimal mumkin bo'lgan quvvatni olish imkonini beradi (3-4-rasm).

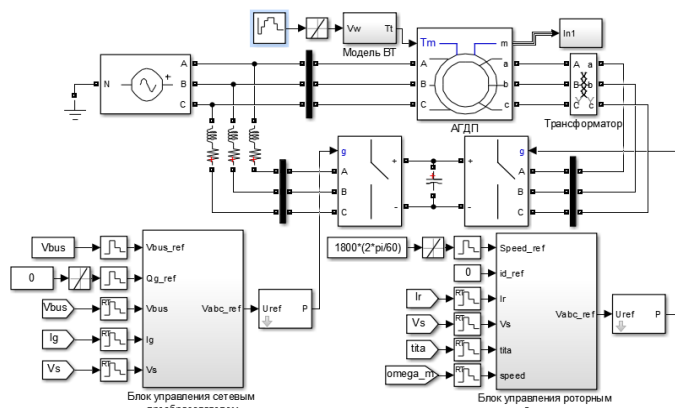


3-rasm. Turli shamol tezliklarida shamol turbinasi quvvati va rotor aylanish tezligining xarakteristikalar



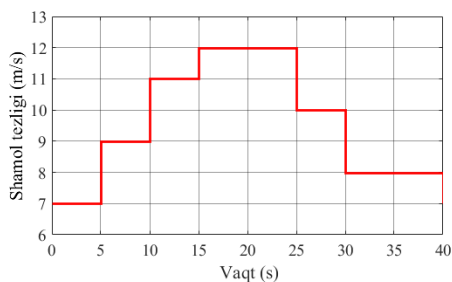
4-rasm. Parraklarning burilish burchagi (β) o'zgarganda shamol turbinasining xarakteristikalar

5-rasmda MATLAB/Simulink muhitida amalga oshirilgan ITTAG modeli ko'rsatilgan (5-rasm).



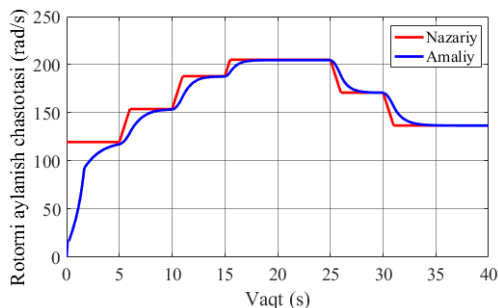
5-rasm. Elektr tarmog'iga ulangan ITTAGning Simulink modeli

Tizim kirishiga berilgan shamol tezligi profili 6-rasmda keltirilgan. Modellashtirish jarayonida shamol tezligi 7 dan 12 m/s gacha bo'lgan diapazonda ketma-ket pog'onali oshirish va kamaytirish orqali o'zgartirilgan. Dastlab shamol tezligi 7 m/s darajasiga o'rnatiladi va tizim boshlang'ich holatdan ishga tushadi. Keyinchalik shamol tezligi pog'onali ravishda o'zgarib, maksimal 12 m/s qiymatga erishadi (6-rasm).



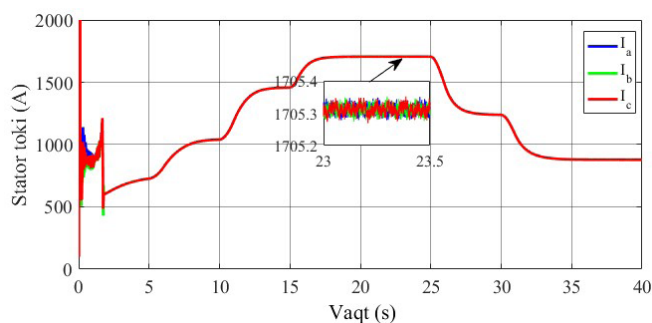
6-rasm. Tizim kirishiga beriladigan shamol tezligining o'zgarishi

7-rasmda shamol tezligining o'zgarishiga bog'liq ravishda rotorning hisobiy va haqiqiy aylanish tezliklari o'zgarishi natijalari keltirilgan. Grafikda generator rotorining amaliy (ko'k egri chiziq) va nazariy (qizil egri chiziq) aylanish tezliklarining vaqt bo'yicha dinamikasi ko'rsatilgan. Nazariy va amaliy tezliklar o'rtasida ma'lum farq mavjud bo'lishiga qaramay, umuman olganda ularning dinamikasi muvofiqlashgan xarakterga ega. Shamol tezligi o'zgarganda rotorning haqiqiy (amaliy) tezligi berilgan hisobiy tezlikni kuzatib boradi, bu esa generator tezligini rostdash tizimi to'g'ri ishlayotganidan dalolat beradi (7-rasm).



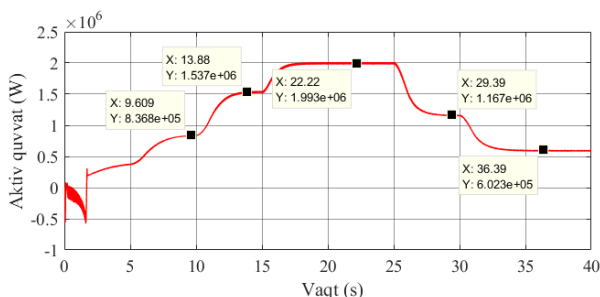
7-rasm. Rotorning amaliy va nazari aylanish tezligining o'zgarishi

8-rasmda tadqiq qilinayotgan ITTAG stator faza toklarining ta'sir etuvchi qiymatlarining vaqt bo'yicha o'zgarishi keltirilgan. Dastlabki vaqtda faza toklarining qisqa muddatli tebranishlari bilan kechadigan o'tkinchi jarayon kuzatiladi. Taxminan 17-25 s oralig'ida stator toklarining qiymati 1705 A (amplituda qiymati 2411 A) darajasida barqarorlashadi. Toklarning oshishi va keyinchalik kamayishi shamol energetika tizimining ish rejimi o'zgarishi bilan bog'liq. 25 s dan so'ng toklarning ta'sir etuvchi qiymatlari asta-sekin kamayadi va modellashtirish oxiriga kelib taxminan 878 A darajasida barqarorlashadi (8-rasm).



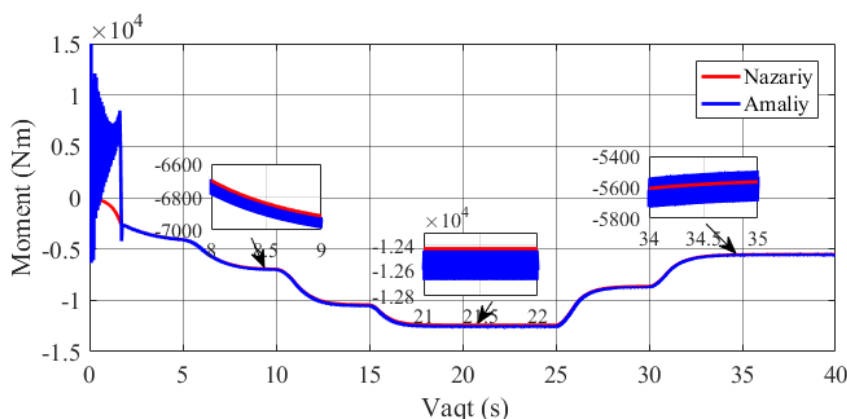
8-rasm. Stator faza toklarining ta'sir etuvchi qiymatlari

9-rasmda ITTAG statorining aktiv quvvati vaqt bo'yicha o'zgarish dinamikasi keltirilgan. Dastlabki 0–2 s oralig'ida ishga tushirish va ish rejimining shakllanishi bilan bog'liq sezilarli o'tkinchi quvvat tebranishlari kuzatiladi. Shundan so'ng quvvat asta-sekin ortadi: 9,6 s da taxminan 0,83 MW ga, 13,8 s da esa 1,53 MW ga yetadi. 18–25 s oralig'ida aktiv quvvat barqarorlashib, maksimal taxminan 2,0 MW qiymatga erishadi. Keyinchalik shamol tezligining o'zgarishi natijasida quvvat kamayadi: 29,4 s da taxminan 1,16 MW, 33,4 s da esa taxminan 0,6 MW darajasida barqarorlashadi (9-rasm).



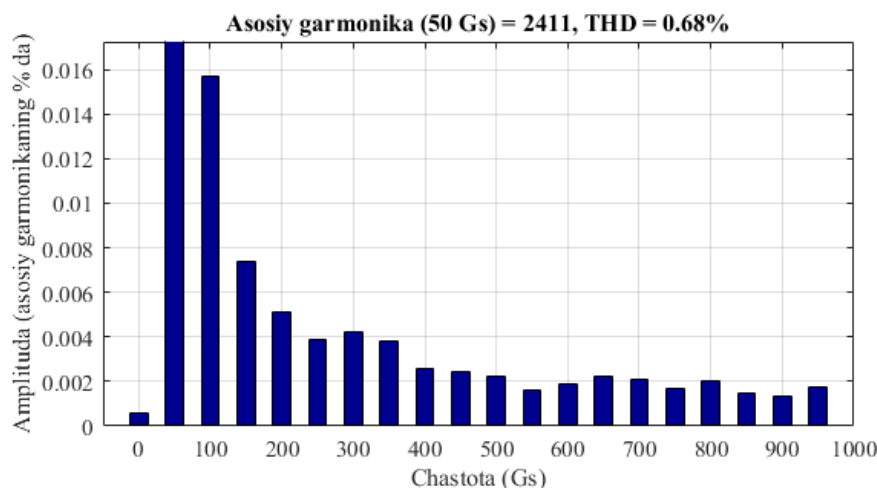
9-rasm. O'zgaruvchan shamol tezligida ITTAG statorining aktiv quvvati o'zgarishi

10-rasmda o'zgaruvchan shamol tezligida ITTAG generatorining nazariy va amaliy elektromagnit momentlari taqqoslangan. Dastlabki 0–2 s oralig'ida tizimning ishga tushishi bilan bog'liq o'tkinchi tebranishlar kuzatiladi. O'tkinchi jarayondan so'ng amaliy moment nazariy qiymatni tez kuzatib boradi. 6–15 s oralig'ida moment –7000 dan –10500 N·m gacha o'zgaradi, 16–25 s oralig'ida esa taxminan –12500 N·m ga yetadi. Keyinchalik moment ish rejimining o'zgarishiga mos ravishda o'zgaradi va 35 s ga kelib taxminan –5600 N·m darajasida barqarorlashadi. Haqiqiy momentning kichik pulsatsiyalari rostdash aniqligidan dalolat beradi (10-rasm).



10-rasm. Nazariy va amaliy elektromagnit momentlarning taqqoslash

11-rasmda 50 Gs asosiy chastotaga nisbatan 0–1 kGs chastota diapazonida bir signal davri uchun stator tokining umumiy garmonik buzilishlar koeffitsiyenti (THD) tahlili natijalari keltirilgan. Tahlil natijalari generator nominal tezlikda ishlaganda stator tokidagi garmonik buzilishlar darajasi yetarlicha past bo'lib, 0,68 % ni tashkil etishini ko'rsatdi. THD qiymatining pastligi stator toki shaklining sinusoidaga yaqinligini va ishlab chiqarilayotgan elektr energiyasining yuqori sifatini ko'rsatadi (11-rasm).



11-rasm. Bir fazali stator tokining umumiy garmonik buzilishlar koeffitsiyenti

Modellashtirish natijalari va keltirilgan xarakteristikalar tahlili asosida shuni xulosa qilish mumkinki, ishlab chiqilgan boshqaruv tizimi turli shamol tezliklarida talab etilgan quvvatni samarali rostdlash va kuzatishni ta'minlaydi. Rotor va tarmoq tomonidagi o'zgartirgichlarning vektorli boshqaruv tizimlari yuqori dinamik xususiyatlarga ega bo'lib, sezilarli o'ta rostdlashsiz berilgan qiymatlarni aniq kuzatishni ta'minlaydi. Taklif etilgan boshqaruv tizimi shamol tezligi o'zgarganda shamol oqimi energiyasini samarali aylantirishni ta'minlaydi. Olingan modellashtirish natijalari ITTAG asosidagi ishlab chiqilgan shamol energetika tizimining ishga layoqatligi va samaradorligini tasdiqlaydi.

XULOSA VA TAKLIFLAR

Ushbu ishda shamol tezligi o'zgarganda shamol energetika tizimini modellashtirish, boshqarish va uning ish rejimlarini tadqiq etish masalalari ko'rib chiqildi. ITTAG asosidagi tarmoqqa ulangan shamol energetika qurilmasining dinamik modeli ishlab chiqildi va tadqiq etildi, shuningdek generatorning elektr tarmog'i bilan samarali o'zaro ishlashini ta'minlaydigan boshqaruv tizimi taklif qilindi. Birinchi bosqichda shamol turbinasi va ITTAGning matematik modellari ishlab chiqildi. Rotor va tarmoq tomonidagi o'zgartirgichlarni boshqarish uchun generator va elektr tarmog'i o'rtasidagi aktiv hamda reaktiv quvvat oqimlarini samarali rostdlashni ta'minlaydigan vektorli boshqaruv strategiyasi qo'llanildi.

Modellashtirish natijalari shamol tezligi o'zgarganda tizimning barqaror ishlashini, shuningdek stator toklarining barqaror va sinusoidaga yaqin shaklini ko'rsatdi. Taklif etilgan boshqaruv strategiyasi shamol tezligi o'zgarganda berilgan parametrlarni tez va aniq kuzatishni ta'minlaydi hamda o'tkinchi rejimlarda tizim barqarorligini saqlaydi. Garmonik buzilishlar tahlili natijalari stator toki THD darajasi past bo'lib, 0,68 % ni tashkil etishini ko'rsatdi, bu esa ishlab chiqarilayotgan elektr energiyasining yuqori sifatini tasdiqlaydi. Ishlab chiqilgan model shamol turbinasining aerodinamik xarakteristikalarini va parraklarning burilish burchagini rostdlash imkoniyatini hisobga oladi. Olingan natijalar o'zgaruvchan aylanish tezligiga ega ITTAG boshqaruv tizimi shamol oqimi energiyasidan samarali foydalanishni ta'minlashini va zamonaviy shamol energetika qurilmalari uchun istiqbolli yechim sifatida qaralishi mumkinligini tasdiqlaydi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati

- Ahmad, T., Zhang, D., Huang, D., Zhang, H., & Dai, N. (2021). Renewable energy in the 21st century: A review of wind and solar energy. *Energy Reports*, 7, 6939–6953. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.09.061>.
- Qazi, A., Hussain, F., Rahim, N.A.B.D., Hardaker, G., Alghazzawi, D., Shaban, K., & Haruna, K. (2019). Towards Sustainable Energy: A Systematic Review of Renewable Energy Sources, Technologies, and Public Opinions. *IEEE Access*, 7, 63837–63851.
- Chhipa, A.A., Vyas, S., Kumar, V., & Joshi, R.R. (2021). Role of Power Electronics and Optimization Techniques in Renewable Energy Systems. In *Intelligent Algorithms for Analysis and Control of Dynamical Systems*. Algorithms for Intelligent Systems. Springer, Singapore, 167–175.
- Global Wind Energy Council (2025). *Global Wind Report 2025: Record Installations Amid Policy Instability*. Global Wind Energy Council (GWEC).
- Carlin, P.W., Laxson, A.S., & Muljadi, E.B. (2003). The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology. *Wind Energy*, 6, 129–159.
- Baroudi, J.A., Dinavahi, V., & Knight, A.M. (2007). A review of power converter topologies for wind generators. *Renewable Energy*, 32, 2369–2385.



7. Abad, G., López, J., Rodríguez, M.Á., Marroyo, L., & Iwanski, G. (2011). *Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation*. John Wiley & Sons.
8. Hansen, A.D., Sørensen, P., Lov, F., & Blaabjerg, F. (2004). Control of Variable Speed Wind Turbines with Doubly-Fed Induction Generators. *Wind Engineering*, 28, 411–432.
9. Ahmed Masmoudi, Grzegorz Iwanski, & Gonzalo Abad. (2011). Modeling and laboratory research on brushless DFIG. *COMPEL*, 31(1), 248–260. <https://doi.org/10.1108/03321641211184959>.
10. Poitiers, F., Bouaouiche, T., & Machmoum, M. (2009). Advanced Control of a Doubly-Fed Induction Generator for Wind Energy Conversion. *Electric Power Systems Research*, 79, 1085–1096.
11. Rezaei, E., Tabesh, A., & Ebrahimi, M. (2012). Dynamic Model and Control of DFIG Wind Energy Systems Based on Power Transfer Matrix. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27, 1485–1493.
12. Pena, R., Clare, J.C., & Asher, G.M. (1996). Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind energy generation. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 143, 231–241.
13. Chhipa, A.A., Chakrabarti, P., Bolshev, V., Chakrabarti, T., Samarin, G., Vasilyev, A.N., Ghosh, S., & Kudryavtsev, A. (2022). Modeling and Control Strategy of Wind Energy Conversion System with Grid-Connected Doubly-Fed Induction Generator. *Energies*, 15, 6694. <https://doi.org/10.3390/en15186694>.
14. Abad, G., Rodríguez, M.Á., Iwanski, G., & Poza, J. (2010). Direct power control of doubly-fed induction generator-based wind turbines under unbalanced grid voltage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(2), 442–452. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2027438>.

muhandislik **& iqtisodiyot**

ijtimoiy-iqtisodiy, innovatsion texnik,
fan va ta'limga oid ilmiy-amaliy jurnal

Ingliz tili muharriri: Feruz Hakimov

Musahhih: Zokir Alibekov

Sahifalovchi va dizayner: Abdurahmon Qurbonov

2026. № 9

© Materiallar ko'chirib bosilganda "Muhandislik va iqtisodiyot" jurnali manba sifatida ko'rsatilishi shart. Jurnalda bosilgan material va reklamalardagi dalillarning aniqligiga mualliflar ma'sul. Tahririyat fikri har vaqt ham mualliflar fikriga mos kelamasligi mumkin. Tahririyatga yuborilgan materiallar qaytarilmaydi.

"Muhandislik va iqtisodiyot" jurnali 26.06.2023-yildan
O'zbekiston Respublikasi Prezidenti Adminstratsiyasi huzuridagi
Axborot va ommaviy kommunikatsiyalar agentligi tomonidan
№S-5669245 reyestr raqami tartibi bo'yicha ro'yxatdan o'tkazilgan.
Litsenziya raqami: №095310.

**Manzilimiz: Toshkent shahri Yunusobod
tumani 15-mavze 19-uy**





+998 93 718 40 07



<https://muhandislik-iqtisodiyot.uz/index.php/journal>



t.me/yait_2100