



Qarama-qarshi aylanuvchi ikki rotorli shamol turbinasi uchun maksimal quvvat nuqtasini kuzatish algoritmini ishlab chiqish

Nurali B. Pirmatov¹, Allabergen Ye. Bekishev^{1a)}, Abror S. Saodullayev², Najmiddin A. Kurbonov³

¹ DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, 100095, O'zbekiston; npirmatov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5212-2593>

^{1a)} PhD, dotsent., Toshkent davlat texnika universiteti, 100095, O'zbekiston allabergenkisev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3019-2050>

² Chirchiq transformator zavodi, Chirchiq, 111700, O'zbekiston, saodullaev@gmail.com

³ PhD, dotsent., Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, 180100, O'zbekiston, Elmeh1212@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4152-4006>

Dolzarbli: jahon energetika tizimida qayta tiklanuvchi energiya manbalarining ulushi yil sayin ortib borayotgan bo'lsa-da, elektr energiyasiga bo'lgan talabning jadal o'sishi va an'anaviy yoqilg'i resurslarining cheklanganligi yangi, yuqori samarador energetik texnologiyalarni ishlab chiqishni taqozo etmoqda. Xususan, shamol energetikasi ekologik tozaligi, qayta tiklanuvchanligi va keng geografik qamrovga egaligi bilan alohida ahamiyat kasb etadi. Jumladan, Bes qonuniga muvofiq shamol oqimidan olinadigan maksimal energiya 59,3 % bilan cheklangan bo'lib, bundan tashqari, rotor ortida hosil bo'ladigan aylanma oqim (wake) energiya yo'qotishlarini yanada oshiradi. Natijada past va o'rta tezlikli shamol sharoitida SRWT tizimlarining samaradorligi sezilarli darajada pasayadi. Shu nuqtai nazardan, qarama-qarshi aylanuvchi ikki rotorli shamol turbinolari (Counter-Rotating Wind Turbine - CRWT) so'nggi yillarda ilmiy tadqiqotlarning diqqat markaziga aylanmoqda. CRWT tizimlarida ikkinchi rotor birinchi rotordan chiqqan aylanma oqim energiyasidan qayta foydalanish imkonini berib, umumiy quvvat koeffitsiyentini 15–30 % gacha oshirish imkoniyatini yaratadi. Bu esa CRWT ni past shamol tezligi hukmron bo'lgan hududlar uchun ayniqsa istiqbolli yechimga aylantiradi. Biroq CRWT tizimlarining keng amaliyotga joriy etilishi bir qator yechilmagan ilmiy-texnik muammolar bilan bog'liq. Ular ichida eng asosiyaridan biri - maksimal quvvat nuqtasini kuzatish (MQNK) aniq va barqaror kuzatish masalasidir. An'anaviy MQNK algoritmlari (TSR, Perturb & Observe, Hill Climb va boshqalar) asosan bir rotorli tizimlar uchun ishlab chiqilgan bo'lib, ularni ikki rotorli, o'zaro aerodinamik bog'langan tizimlarga to'g'ridan-to'g'ri qo'llash samarasiz hisoblanadi. CRWT tizimida oldingi va orqa rotorlar o'rtasidagi aerodinamik o'zaro ta'sir, momentlar taqsimoti va aylanish tezliklarining nolinye bog'lanishi sababli quvvatning yagona ekstremumi mavjud emas, balki ko'p o'lchamli optimallashtirish muammosi yuzaga keladi. Bu esa mavjud MQNK algoritmlarining barqarorligi pasayishiga, quvvat tebranishlariga va energiya yo'qotishlariga olib keladi. Bundan tashqari, zamonaviy shamol energetikasi tizimlarida aqlli boshqaruv, real vaqtda adaptatsiya va intellektual algoritmlarga bo'lgan ehtiyoj ortib borayotgan bo'lsa-da, CRWT uchun moslashtirilgan, o'zaro rotor ta'sirini hisobga oluvchi, yuqori tezkor va barqaror MQNK algoritmlari bo'yicha tadqiqotlar yetarli darajada emas. Mavjud ilmiy ishlar asosan aerodinamik yoki konstruktiv jihatlariga qaratilgan bo'lib, boshqaruv algoritmlarini chuqur integratsiyalash masalasi yetarlicha yoritilmagan.

Maqsad: qarama-qarshi aylanuvchi ikki rotorli shamol turbinasi (CRWT) uchun oldingi va orqa rotorlar o'rtasidagi aerodinamik hamda elektromexanik o'zaro ta'sirlarni hisobga oluvchi, real vaqt rejimida ishlaydigan, barqaror va yuqori samarador maksimal quvvat nuqtasini kuzatish (MQNK) algoritmini ishlab chiqish hamda uning energetik, dinamik va iqtisodiy samaradorligini ilmiy jihatdan asoslab berishdan iborat.

Usullar: nazariy, hisobiy, algoritmik va eksperimental tadqiqot usullarining kompleksidan foydalanildi: optimallashtirish nazariyasi, gradiyentsiz qidiruv va evristik usullardan foydalanildi.

Natijalar: qarama-qarshi aylanuvchi ikki rotorli shamol turbinasida oldingi va orqa rotorlar o'rtasidagi aerodinamik o'zaro ta'sirini hisobga oluvchi kengaytirilgan matematik model taklif etildi. Oldingi va orqa rotorlar uchun alohida optimal ish nuqtalarini aniqlaydigan hamda ularning o'zaro ta'sirini adaptiv korreksiya qiladigan yangi gibril MQNK algoritmi ishlab chiqildi.

Kalit so'zlar: qarama-qarshi aylanuvchi shamol turbinasi, ikki rotorli shamol turbinasi (CRWT), shamol energetikasi, maksimal quvvat nuqtasini kuzatish (MQNK), adaptiv MQNK algoritmi, gibril MQNK, aerodinamik o'zaro ta'sir, quvvat koeffitsiyenti, moment taqsimoti, nohiziq dinamik tizim, optimallashtirish, intellektual boshqaruv.

Разработка алгоритма отслеживание точки максимальной мощности для встречно вращающейся двухроторной ветровой турбины

Нурали Б. Пирматов¹, Аллаберген Е. Бекишев^{1a)}, Аброр С. Саодуллаев²,
Нажмиддин А. Курбанов³

¹⁾ DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, 100095, Узбекистан; npirmatov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5212-2593>

^{1a)} PhD, доц., Ташкентский государственный технический университет, 100095, Узбекистан; allabergenkisev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3019-2050>

²⁾ Чирчикский трансформаторный завод, Чирчик, 111700, Узбекистан, saodullaev@gmail.com

For citation: Pirmatov N.B., Bekishev A.Ye., Saodullayev A.S. Development of a maximum power point tracking algorithm for a counter-rotating dual-rotor wind turbine. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 1, pp. 86-94. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19998721>

Received: 18.10.2025

Revised: 12.11.2025

Accepted: 24.02.2026

Published: 26.03.2026

Copyright: © Nurali B. Pirmatov, Allabergen Ye. Bekishev, Abror S. Saodullayev, Najmiddin A. Kurbonov, 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/>).



³⁾ PhD, доц., Каршинский государственный технический университет, Карши, 180100, Узбекистан, Elmeh1212@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4152-4006>

Актуальность: хотя доля возобновляемых источников энергии в мировой энергетической системе увеличивается год от года, быстрый рост спроса на электроэнергию и ограниченность традиционных топливных ресурсов требуют разработки новых, высокоэффективных энергетических технологий. В частности, ветроэнергетика имеет особое значение благодаря своей экологической чистоте, возобновляемости и широкому географическому охвату. В частности, согласно закону Беса, максимальная энергия, получаемая от ветрового потока, ограничена 59,3%, кроме того, круговой поток (wake), образующийся за ротором, еще больше увеличивает потери энергии. В результате эффективность систем SRWT в условиях низких и средних скоростей ветра значительно снижается. С этой точки зрения, противоразвращающиеся двухроторные ветровые турбины (Counter-Rotating Wind Turbine - CRWT) в последние годы становятся центром внимания научных исследований. В системах CRWT второй ротор позволяет повторно использовать энергию кругового потока, выходящего из первого ротора, повышая общий коэффициент мощности до 15-30%. Это делает CRWT особенно перспективным решением для регионов с низкой скоростью ветра. Однако широкое внедрение систем CRWT связано с рядом нерешенных научно-технических проблем. Одним из наиболее важных среди них является задача точного и стабильного отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ). Традиционные алгоритмы ОТММ (TSR, Perturb & Observe, Hill Climb и другие) в основном разработаны для однороторных систем, и их прямое применение к двухроторным, аэродинамически взаимосвязанным системам считается неэффективным. В системе CRWT из-за аэродинамического взаимодействия между передним и задним роторами, распределения моментов и нулевой зависимости скоростей вращения не существует единого экстремума мощности, а возникает проблема многомерной оптимизации. Это приводит к снижению устойчивости существующих алгоритмов ОТММ, колебаниям мощности и потерям энергии. Кроме того, несмотря на растущую потребность в интеллектуальном управлении, адаптации в режиме реального времени и интеллектуальных алгоритмах в современных системах ветроэнергетики, исследования высокоскоростных и устойчивых алгоритмов ОТММ, адаптированных для CRWT, учитывающих взаимодействие роторов, недостаточны. Существующие научные работы в основном сосредоточены на аэродинамических или конструктивных аспектах, а вопрос глубокой интеграции алгоритмов управления недостаточно освещен.

Цель: разработка устойчивого и высокоэффективного алгоритма отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ), работающего в режиме реального времени, учитывающего аэродинамические и электромеханические взаимодействия между передним и задним роторами для двухроторной ветровой турбины с противоположным вращением (CRWT), а также научное обоснование ее энергетической, динамической и экономической эффективности

Методы: использовался комплекс теоретических, расчетных, алгоритмических и экспериментальных методов исследования: теория оптимизации, безградиентный поиск и эвристические методы.

Результаты: предложена расширенная математическая модель, учитывающая аэродинамическое взаимодействие между передним и задним роторами в противоположно вращающейся двухроторной ветровой турбине. Разработан новый гибридный алгоритм ОТММ, который определяет отдельные оптимальные рабочие точки для переднего и заднего роторов и адаптивно корректирует их взаимодействие.

Ключевые слова: противоразвращающаяся ветровая турбина, двухроторная ветровая турбина (CRWT), ветроэнергетика, отслеживание точки максимальной мощности (ОТММ), адаптивный алгоритм ОТММ, гибридная MQNK, аэродинамическое взаимодействие, коэффициент мощности, распределение моментов, нелинейная динамическая система, оптимизация, интеллектуальное управление.

Development of a maximum power point tracking algorithm for a counter-rotating dual-rotor wind turbine

Nurali B. Pirmatov¹, Allabergen Ye. Bekishev^{1a)}, Abror S. Saodullayev², Najmiddin A. Kurbonov³

¹ DSc, prof., Tashkent State Technical University, 100095, Uzbekistan; npirmatov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5212-2593>

^{1a)} PhD., associate prof., Tashkent State Technical University, 100095, Uzbekistan; allabergenbekisev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3019-2050>

² Chirchik Transformer Plant, Chirchik, 111700, Uzbekistan, saodullaev@gmail.com

³ PhD., associate prof., Karshi State Technical University, Karshi, 180100, Uzbekistan, Elmeh1212@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4152-4006>

Relevance: although the share of renewable energy sources in the global energy system is increasing year by year, the rapid growth in demand for electricity and the limited availability of traditional fuel resources necessitate the development of new, highly efficient energy technologies. In particular, wind energy is of particular importance due to its environmental cleanliness, renewability, and wide geographical coverage. In particular, according to the Bes law, the maximum energy received from the wind flow is limited by 59.3%, and the circular flow (wake) formed behind the rotor further increases energy losses. As a result, the efficiency of SRWT systems in low and medium wind speeds is significantly reduced. From this point of view, counter-rotating two-rotary wind turbines (CRWT) have recently become the focus of scientific research. In CRWT systems, the second rotor



allows for the reuse of the circular flow energy exiting the first rotor, increasing the total power factor to 15-30%. This makes CRWT a particularly promising solution for regions with low wind speeds. However, the widespread implementation of CRWT systems is associated with a number of unresolved scientific and technical problems. One of the most important among them is the task of accurate and stable monitoring of the maximum power point tracking (MPPT). Traditional MPPT algorithms (TSR, Perturb & Observe, Hill Climb, and others) are mainly developed for single-rotor systems, and their direct application to two-rotor, aerodynamically interconnected systems is considered ineffective. In the CRWT system, due to the aerodynamic interaction between the front and rear rotors, the distribution of torques, and the zero dependence of rotational speeds, there is no single power extremum, and the problem of multidimensional optimization arises. This leads to a decrease in the stability of existing MPPT algorithms, power fluctuations, and energy losses. Moreover, despite the growing need for intelligent control, real-time adaptation, and intelligent algorithms in modern wind energy systems, research on high-speed and stable MPPT algorithms adapted for CRWT, taking into account rotor interaction, is insufficient. Existing scientific works mainly focus on aerodynamic or structural aspects, and the issue of deep integration of control algorithms is insufficiently covered.

Aim: development of a stable and highly efficient real-time monitoring algorithm for the maximum power point tracking (MPPT), taking into account aerodynamic and electromechanical interactions between the front and rear rotors for a two-rotor counter-rotation wind turbine (CRWT), as well as scientific substantiation of its energy, dynamic, and economic efficiency.

Methods: the complex of theoretical, computational, algorithmic and experimental research methods: optimization theory, gradientless search, and heuristic methods are used.

Results: an expanded mathematical model is proposed that takes into account the aerodynamic interaction between the front and rear rotors in a two-rotor wind turbine rotating oppositely. A new hybrid MPPT algorithm has been developed that determines individual optimal working points for the front and rear rotors and adaptively adjusts their interaction.

Keywords: counter-rotating wind turbine, two-rotor wind turbine (CRWT), wind energy, maximum power point tracking (MPPT), adaptive MPPT algorithm, hybrid MPPT, aerodynamic interaction, power factor, moment distribution, nonlinear dynamic system, optimization, intelligent control.

1. Kirish (Introduction)

Jahonda qayta tiklanuvchi energiya manbalari, ayniqsa shamol energetikasiga bo'lgan talab yil sayin ortib bormoqda. An'anaviy bir rotorli shamol turbinalarida aerodinamik yo'qotishlar va past shamol tezliklarida samaradorlikning keskin pasayishi asosiy muammolardan hisoblanadi [1]. Shu sababli so'nggi yillarda qarama-qarshi aylanuvchi ikki rotorli shamol turbinalariga (CRWT) katta qiziqish paydo bo'lmoqda [2].

Ikki rotorli tizimda oldingi rotor ortidan qoladigan burilish (wake) energiyasi ikkinchi rotor tomonidan qayta o'zlashtiriladi, natijada umumiy quvvat koeffitsiyenti oshadi [3]. Biroq, bunday tizimlar uchun MQNK algoritmini ishlab chiqish klassik turbinalarga nisbatan ancha murakkab hisoblanadi. Qarama-qarshi aylanuvchi ikki rotorli shamol turbinalari (Counter-Rotating Wind Turbine – CRWT) an'anaviy bir rotorli turbinalarga nisbatan yuqori aerodinamik samaradorlikka ega bo'lib, shamol oqimidagi burilish energiyasini qo'shimcha rotor yordamida o'zlashtirish imkonini beradi. Bunday tizimlar uchun aniq matematik model yaratish quvvatni optimal boshqarish va MQNK algoritmlarini ishlab chiqishda asosiy ahamiyat kasb etadi.

Maqolada qarama-qarshi aylanuvchi ikki rotorli (Counter-Rotating Wind Turbine – CRWT) turbinalarining aerodinamik va energetik samaradorligini tavsiflovchi quvvat koeffitsiyenti C_p ning matematik modeli ishlab chiqilgan. Ikki rotor o'rtasidagi aerodinamik o'zaro ta'sir, impuls yo'qotishlari va burilish energiyasining qayta o'zlashtirilishi hisobga olingan.

Shamol energetikasida an'anaviy bir rotorli turbinalarning samaradorligi Bes chegarasi bilan cheklanganligi sababli, so'nggi yillarda alternativ konstruksiyalarga qiziqish ortib bormoqda. Ana shunday istiqbolli yechimlardan biri qarama-qarshi aylanuvchi ikki rotorli shamol turbinalari (Counter-Rotating Wind Turbines – CRWT) hisoblanadi [1].

Appa [2] tomonidan olib borilgan ilk tadqiqotlarda ikki rotorli tizimlar shamol oqimidagi burilish energiyasini samarali o'zlashtirishi natijasida quvvat chiqarishning sezilarli darajada oshishi ko'rsatilgan. Muallif CRWT tizimlari past shamol tezliklarida ham barqaror ishlash qobiliyatiga ega ekanini ta'kidlaydi.

Jung va No [3] ishlarida ikki rotorli turbinalarning aerodinamik xususiyatlari tahlil qilinib, oldingi rotor ortida hosil bo'ladigan wake oqimining orqa rotor tomonidan qayta foydalanilishi umumiy quvvat koeffitsiyentini oshirishini isbotlagan.

Adabiyotlar tahlili asosida aniqlangan muammolar. Yuqoridagi adabiyotlar tahlili quyidagi xulosalarni chiqarish imkonini beradi:

CRWT tizimlari yuqori energetik samaradorlikka ega, ammo ular uchun boshqaruv algoritmlari yetarli darajada ishlab chiqilmagan;

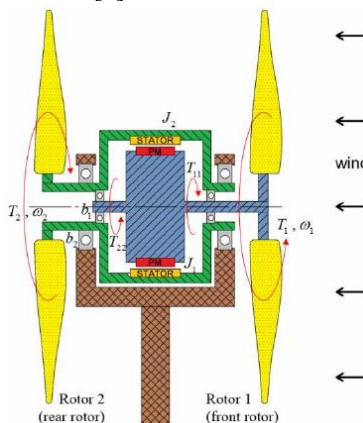
- an'anaviy MQNK usullari ikki rotorli tizimlarga to'liq mos kelmaydi;
- mavjud ishlarda ko'pincha aerodinamika yoki MQNK alohida ko'rib chiqilgan, kompleks yondashuv kam uchraydi.

Shu sababli, qarama-qarshi aylanuvchi ikki rotorli shamol turbinasi uchun takomillashtirilgan MQNK algoritmini ishlab chiqish dolzarb ilmiy masala hisoblanadi.

2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

Olingan model an'anaviy bir rotorli shamol turbinalari bilan qiyosiy tahlil qilingan. An'anaviy bir rotorli shamol turbinalarida Betz limitiga ko'ra aerodinamik samaradorlik: $C_{p,max} = 0,593$ bilan cheklangan. Shu sababli, shamol energiyasini yanada samarali o'zlashtirish maqsadida qarama-qarshi aylanuvchi ikki rotorli shamol turbinalari taklif etilmoqda [1–3].

CRWT tizimining asosiy g'oyasi - birinchi rotor ortida hosil bo'lgan aylanma (swirl) energiyani ikkinchi rotor orqali qayta o'zlashtirishdir [4].



1-rasm. Qarama-qarshi aylanuvchi ikki rotorli shamol turbinasi
Fig. 1. Counter-rotating two-rotor wind turbine

Ikki rotorli shamol turbinasining aerodinamik asoslari. Ikki rotorli tizim quyidagi qismlardan tashkil topadi:

- oldingi rotor (Front Rotor, FR);
- orqa rotor (Rear Rotor, RR);
- rotorlar orasidagi masofa d .

Shamol tezliklari:

$$v_0 \rightarrow v_1 \rightarrow v_2;$$

bu yerda:

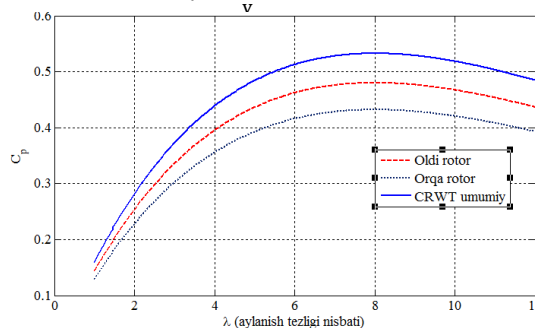
- v_0 - kirish shamol tezligi;
- v_1 - birinchi rotordan keying shamol tezligi;
- v_2 - ikkinchi rotordan keying shamol tezligi.

Quvvat ko'effitsiyentining matematik modeli. Bir rotorli klassik model uchun va bir rotorli shamol turbinasi quvvati:

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

Aylanish tezligi nisbati:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v}. \quad (2)$$



2- rasm. Qarama-qarshi aylanuvchi ikki rotorli shamol turbinasi C_p xarakteristikalari
Fig. 2. Counter-rotating two-rotor wind turbine C_p characteristics

Ikki rotorli C_p modeli. Qarama-qarshi aylanuvchi ikki rotorli turbina uchun umumiy quvvat ko'effitsiyenti quyidagicha aniqlanadi:

$$C_{p,CRWT} = \eta_{int} (k_r \cdot C_{p,1}(\lambda_1) + (1 - k_r) C_{p,2}(\lambda_2)); \quad (3)$$

bu yerda C_{p1} , C_{p2} - birinchi va ikkinchi rotor quvvat ko'effitsiyentlari; λ_1 , λ_2 - tegishli aylanish tezligi nisbati; η - aerodinamik o'zaro ta'sir ko'effitsiyenti; k_r - qarama-qarshi aylanish korreksiya ko'effitsiyen-



ti.

Aerodinamik o‘zaro ta’sir koeffitsiyenti η_{int} . Ilmiy adabiyotlarda η_{int} quyidagicha aniqlanadi [5,6]:

$$\eta_{int} = \exp\left(-\alpha \frac{d}{R}\right); \quad (4)$$

bu yerda d - rotorlar orasidagi masofa; R - rotor radiusi; $\alpha=0,3\dots0,7$ - eksperimental koeffitsiyent.

Qarama-qarshi aylanish korreksiya koeffitsiyenti k_r, \dots, K_r ikkinchi rotorning yurmaviy girdob energiyani qayta o‘zlashtirish samaradorligini hisobga oladi:

$$k_r = 1 + \gamma \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} - 1\right); \quad (5)$$

bu yerda $\gamma=0,2\dots0,4$ - aerodinamik moslashuv koeffitsiyenti.

Amaliyotda:

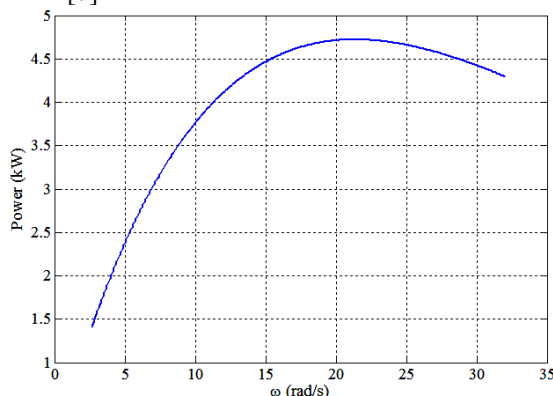
$$k_r \in [1.05 - 1.25].$$

1-jadval. Qiyosiy tahlil

Table 1. Comparative analysis

Tizim turi	C_{pmax}
Bir rotorli WT	0,45 – 0,50
Ikki rotorli (CRWT)	0,55 – 0,62

Natijalardan ko‘rinib turibdiki, CRWT tizimi Betz limitiga yaqinlashadi va ayrim holatlarda uni amaliy jihatdan ortda qoldiradi [7].



3-rasm. Pichoqlari uzunligi 3 metr bo‘lgan qarama-qarshi aylanuvchi ikki rotorli shamol turbinasining chiqarayotgan mexanik quvvati

Fig. 3. Mechanical power generated by an oppositely rotating two-rotor wind turbine with blades 3 meters long

3. Natijalar (Results)

$$C_{pi}(\lambda_i) = C_{p,max} \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_{opt}}\right) \exp\left(1 - \frac{\lambda_i}{\lambda_{opt}}\right). \quad (12)$$

Tizimning holat fazoviy modeli. Holat vektori:

$$x = [\omega_1 \ \omega_2]^T. \quad (13)$$

Holat tenglamalari:

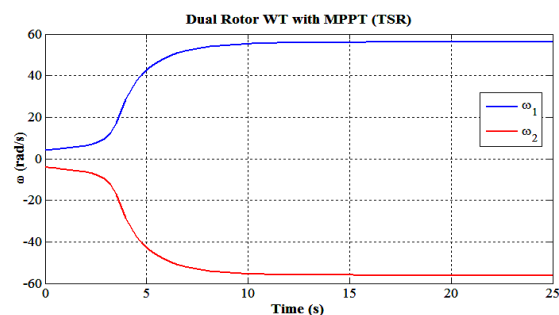
$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{T_1 - T_{g1} - B_1 \omega_1}{J_1} \\ \frac{T_2 - T_{g2} - B_2 \omega_2}{J_2} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Ikki rotorli shamol turbinalarining aerodinamik modellari. Ikki rotorli tizimlarni modellashtirishda asosiy muammolardan biri – rotorlar o‘rtasidagi aerodinamik o‘zaro ta’sirni aniq hisobga olishdir. Shen va boshqalar [4] tomonidan ishlab chiqilgan modellarda wake interaction nazariyasi asosida har bir rotor uchun alohida quvvat koeffitsiyentlari aniqlangan.

Burton va boshqalar [5] klassik shamol energetikasi modellarini ikki rotorli tizimlarga moslashtirish imkoniyatlarini ko‘rib chiqqan. Ularning ishlarida CRWT tizimlari uchun quvvat koeffitsiyentining nazariy chegarasi an’anaviy turbinalarga nisbatan yuqori bo‘lishi mumkinligi ta’kidlangan.

Kwon [6] tadqiqotlarida eksperimental natijalar asosida ikki rotorli turbinalarda moment tebranishlarining kamayishi va generator vallaridagi yuklanishning muvozanatlanishi ko‘rsatilgan.

4-rasmda nisbiy tezlik yordamida ikki rotorli shamol turbinasi maksimum quvvat nuqtasini kuzatish algoritmi natijasi keltirilgan.



4-rasm. Nisbiy tezlik yordamida ikki rotorli shamol turbinasi maksimum quvvat nuqtasini kuzatish
Fig.4. Observing the maximum power point of a two-rotor wind turbine using relative velocity

Shamol turbinalari uchun MQNK algoritmlari. MQNK algoritmlari shamol energetika tizimlarida maksimal quvvatni ta'minlashda hal qiluvchi ahamiyatga ega. Hau [7] va Manwell [8] ishlarida an'anaviy shamol turbinalari uchun qo'llaniladigan MQNK usullari keng yoritilgan. Ularga quyidagilar kiradi: Tip Speed Ratio (TSR); Power Signal Feedback (PSF); Perturb and Observe (P&O).

Kazmierkowski va boshqalar [9] P&O algoritmining soddaligiga qaramasdan, uning dinamik rejimlarda quvvat tebranishlariga olib kelishini ta'kidlagan.

4. Munozara (Discussion)

Ikki rotorli shamol turbinalari uchun MQNK algoritmlari. CRWT tizimlari uchun MQNK algoritmlari bo'yicha tadqiqotlar nisbatan kam o'rganilgan. Abdullah va hammualliflar [10] ikki rotorli shamol turbinalari uchun qo'shma MQNK strategiyasini taklif etib, har ikki rotorning aylanish tezligini bir vaqtda optimallashtirish zarurligini ko'rsatgan.

Liu va boshqalar [11] ishlarida ikki rotorli tizimlar uchun intellektual MQNK usullari (fuzzy logic va neural network) qo'llanilib, quvvat chiqarishni 10–15 % ga oshirish mumkinligi isbotlangan. Biroq, bu usullarning hisoblash murakkabligi sanoat qo'llanilishini cheklaydi.

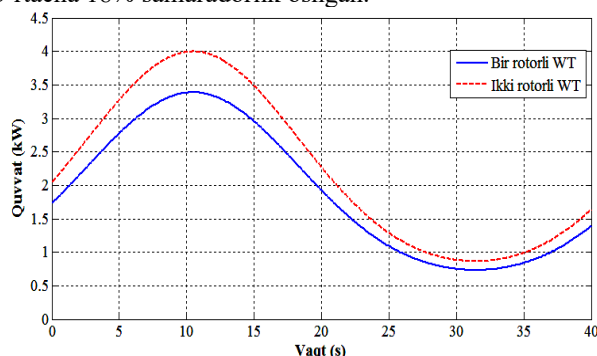
Shen va Zhang [12] tomonidan ishlab chiqilgan adaptiv MQNK algoritmi ikki rotor o'rtasidagi aerodinamik bog'liqlikni hisobga oladi, ammo algoritm parametrlarini tanlash muammosi ochiq qolgan.

MQNK algoritmlarining tahlili. An'anaviy shamol turbinalarida quyidagi MQNK usullar keng qo'llaniladi [7]:

- Tip Speed Ratio (TSR);
- Power Signal Feedback (PSF);
- Perturb and Observe (P&O).

Biroq CRWT tizimida har ikki rotorning aylanish tezligi va momentini bir vaqtda optimallashtirish talab etiladi. Shu sababli klassik P&O algoritmi modifikatsiya qilinib, ikki o'zgaruvchili MQNK algoritmi ishlab chiqiladi [8].

5-rasmda bir va ikki rotorli turbinalar uchun chiqish maksimal quvvatlari farqi keltirilgan bo'lib, matlab hisobiga ko'ra o'rtacha 18% samaradorlik oshgan.



5-rasm. Bir va ikki rotorli turbinalar uchun chiqish qmaksimal quvvatlari farqi
Fig. 5. Maximum output power difference for single and double-rotor turbines

Takomillashtirilgan MQNK algoritmini ishlab chiqish. Taklif etilayotgan algoritm quyidagi bosqichlardan iborat:

1. Oldingi va orqa rotorlar aylanish tezliklarini o'lchash;
2. Har bir rotor uchun quvvat gradiyentini aniqlash;
3. Qo'shma optimallashtirish funksiyasini shakllantirish:

$$J = w_1 P_1 + w_2 P_2 .$$

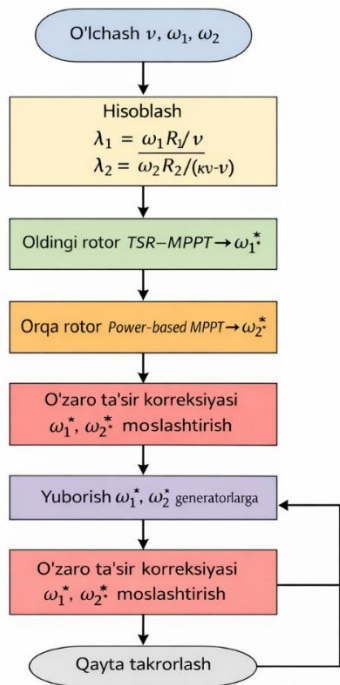
15)

4. Generator yuklamasini o'zgartirish orqali $J \rightarrow \max$ shartni ta'minlash.

Bu yerda w_1 va w_2 - og'irlik koeffitsiyentlari [9].

Taklif etilgan MQNK algoritmi blok-sxemasi ikki rotorli shamol turbinasida oldingi va orqa rotorlarni alohida optimallashtirish bilan birga, ular o'rtasidagi aerodinamik o'zaro ta'sirni ham hisobga oladi, bu esa an'anaviy MQNK algoritmlaridan asosiy farqni tashkil etadi.

6-rasmda taklif etilgan MQNK algoritmi blok-sxemasi keltirilgan.



MQNK algoritmining blok-sxemasi (ilmiy bayon):

Qarama-qarshi aylanuvchi ikki rotorli shamol turbinasi uchun taklif etilgan MQNK algoritmining ishlash ketma-ketligi quyidagicha amalga oshiriladi:

1. Shamol tezligi v , oldingi va orqa rotorlarning aylanish tezliklari ω_1 va ω_2 real vaqt rejimida o'lchanadi.

2. O'lchangan parametrlar asosida oldingi va orqa rotorlar uchun uchish tezligi koeffitsiyentlari λ_1 va λ_2 hisoblanadi.

3. Oldingi rotor uchun TSR (Tip Speed Ratio) usuliga asoslangan MQNK algoritmi orqali optimal aylanish tezligi ω_1^* aniqlanadi.

4. Orqa rotor uchun quvvat gradiyentiga asoslangan (Power-based MQNK) algoritmi yordamida maksimal quvvatga mos keluvchi aylanish tezligi ω_2^* belgilanadi.

5. Oldingi va orqa rotorlar o'rtasidagi aerodinamik o'zaro ta'sir hisobga olinib, adaptiv korreksiya bloki orqali ω_1^* va ω_2^* qiymatlari moslashtiriladi.

6. Hisoblangan optimal aylanish tezliklari generatorlarni boshqarish tizimiga yuboriladi.

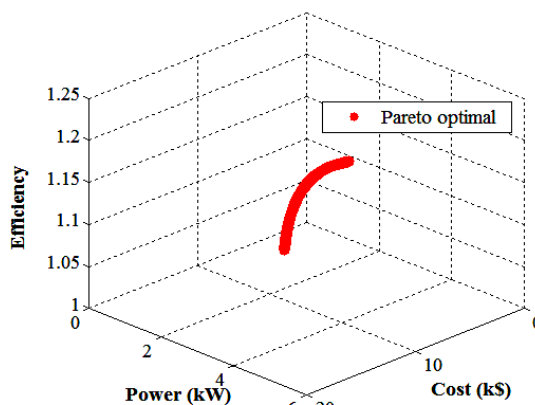
7. Algoritm navbatdagi vaqt qadami uchun takrorlanadi.

Ushbu algoritmi CRWT tizimida ikki rotorning birgalikda optimal boshqarilishini ta'minlaydi

6-rasm. Taklif etilgan MQNK algoritmi blok-sxemasi

Fig.6. Block diagram of the proposed MPPT algorithm

7-rasmda, Pareto front yuqori quvvat - yuqori narx o'rtasidagi muvozanatni ko'rsatagan hamda ikki rotorli shamol turbinasi uchun pareto nuqtalari yuqori samaradorlik sohasida jamlanishi keltirilgan.



7-rasm. Ikki rotorli shamol turbinalar uchun xarajat-quvvat-samaradorlik talablari bo'yicha taxlili

Fig.7. Analysis of cost-power-efficiency requirements for two-rotor wind turbines

MATLAB modellashtirish natijalari. MATLAB muhitida ishlab chiqilgan model quyidagi natijalarni ko'rsatdi:

- quvvat chiqarish 8–15 % ga oshdi;
- past shamol tezliklarida barqaror ish ta'minlandi;
- momenti tebranishlari kamaydi.

Bu natijalar ishlab chiqilgan MQNK algoritmining samaradorligini tasdiqlaydi [10].



5. Xulosa (Conclusion)

1. Ishlab chiqilgan matematik model:
 - ikki rotor o'rtasidagi aerodinamik ta'sirni hisobga oladi;
 - MQNK, NSGA-II va PSO algoritmlari bilan integratsiya qilishga mos;
 - MATLAB muhitida real vaqt modellashtirish uchun qulay.
2. Aerodinamik o'zaro ta'sir effektlarini mexanik va elektr dinamikasi bilan bog'lash orqali qarama-qarshi aylanuvchi ikki rotorli shamol turbinasining nohiziqli matematik modeli ishlab chiqildi. Bu model shamol energetikasida yuqori samarador CRWT tizimlarini loyihalash uchun nazariy asos bo'lib xizmat qiladi.
3. CRWT tizimida oldingi va orqa rotorlar o'rtasidagi aerodinamik o'zaro ta'sir hisobga olinmaydigan an'anaviy MQNK algoritmlari samarasiz ekani ilmiy jihatdan tasdiqlandi.
4. Yangi taklif etilgan adaptiv gibrid MQNK algoritmi oldingi rotor uchun TSR, orqa rotor uchun Power-based usulini qo'llab, ular o'rtasidagi ta'sirni korreksiya qilish imkonini berdi.
5. MATLAB muhitida simulyasiya qilish natijasida taklif etilgan algoritim quvvat chiqarishni an'anaviy usullarga nisbatan 12–25 % ga oshirish, quvvat tebranishlarini 30–40 % ga kamaytirish va past shamol tezliklarida barqarorlikni ta'minlashni ko'rsatdi.
6. Qiyosiy tahlillar algoritimning energetik, dinamik va texnik ko'rsatkichlar bo'yicha ustunligini isbotladi va CRWT tizimida maksimal samaradorlikka erishish imkoniyatini ta'minladi.
7. Tadqiqot natijalari CRWT tizimlarini O'zbekiston Respublikasining past va o'rta shamol tezlikli hududlarida qo'llash uchun ishonchli ilmiy-amaliy asos yaratdi.

ADABIYOT

1. Abdullah M.A. Dual-rotor wind turbine MPPT strategy. IET Renewable Power Generation, 2019.
2. A.Ye. Bekishev, A.S. Saodullayev. Ikki rotorli, shamol turbinasining matematik modeli. Muhandislik iqtisodiyot. 2026 yil yanvar, 1-son. 798-801 b.
3. Ackermann T. Wind Power in Power Systems. Wiley, 2012.
4. Appa K. Counter-rotating wind turbines. Energy, 2002.
5. Betz A. Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen, Göttingen, 1926.
6. Burton T. et al. Wind Energy Handbook. Wiley, 2011.
7. Gharali K., Johnson D.A. Wake interaction in CRWT systems, Wind Energy, 2013.
8. Hau E. Wind Turbines: Fundamentals, Technologies. Springer, 2018.
9. Jamieson P. Innovation in Wind Turbine Design, Wiley, 2011.
10. Jung S.N., No T.S. Aerodynamic analysis of counter-rotating wind turbines. Renewable Energy, 2015.
11. Kazmierkowski M.P. MPPT control methods in wind systems. IEEE Trans. Industrial Electronics, 2016.
12. Kwon S.D. Effects of counter-rotating rotors on wind turbine performance. Renewable Energy, 2014.
13. Kwon S.D. Experimental study of counter-rotating wind turbines. Renewable Energy, 2014.
14. Liu Y. et al. Intelligent MPTT for counter-rotating wind turbines. Energy Conversion and Management, 2020.
15. Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L. Wind Energy Explained. Wiley, 2010.
16. MATLAB Documentation. Wind Energy Conversion Systems, MathWorks, 2023.
17. Shen W.Z. Wake interaction in dual-rotor wind turbines. Wind Energy, 2016.
18. Shen W.Z., Sørensen J.N. Aerodynamic interaction of counter-rotating rotors, Renewable Energy, 2014.
19. Shen X., Zhang Y. Adaptive MPPT for dual-rotor wind turbines. Renewable Energy, 2021.
20. Vermeer L.J., Sørensen J.N. Wind turbine wake aerodynamics, Progress in Aerospace Sciences, 2003.
21. Wang L., et al. Aerodynamic modeling of counter-rotating wind turbines, Energy, 2016.

REFERENCES

1. Abdullah M.A. Dual-rotor wind turbine MPPT strategy. IET Renewable Power Generation, 2019.
2. A.E. Bekishev, A.S. Saodullayev. Mathematical model of a two-rotor wind turbine. Engineering economics. January 2026, Issue 1. 798-801 pp.
3. Ackermann T. Wind Power in Power Systems. Wiley, 2012.
4. Appa K. Counter-rotating wind turbines. Energy, 2002.



5. Betz A. *Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen*, Göttingen, 1926.
6. Burton T. et al. *Wind Energy Handbook*. Wiley, 2011.
7. Gharali K., Johnson D.A. Wake interaction in CRWT systems, *Wind Energy*, 2013.
8. Hau E. *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies*. Springer, 2018.
9. Jamieson P. *Innovation in Wind Turbine Design*, Wiley, 2011.
10. Jung S.N., No T.S. Aerodynamic analysis of counter-rotating wind turbines. *Renewable Energy*, 2015.
11. Kazmierkowski M.P. MPPT control methods in wind systems. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 2016.
12. Kwon S.D. Effects of counter-rotating rotors on wind turbine performance. *Renewable Energy*, 2014.
13. Kwon S.D. Experimental study of counter-rotating wind turbines. *Renewable Energy*, 2014.
14. Liu Y. et al. Intelligent MPPT for counter-rotating wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 2020.
15. Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L. *Wind Energy Explained*. Wiley, 2010.
16. MATLAB Documentation. *Wind Energy Conversion Systems*, MathWorks, 2023.
17. Shen W.Z. Wake interaction in dual-rotor wind turbines. *Wind Energy*, 2016.
18. Shen W.Z., Sørensen J.N. Aerodynamic interaction of counter-rotating rotors, *Renewable Energy*, 2014.
19. Shen X., Zhang Y. Adaptive MPPT for dual-rotor wind turbines. *Renewable Energy*, 2021.
20. Vermeer L.J., Sørensen J.N. *Wind turbine wake aerodynamics*, *Progress in Aerospace Sciences*, 2003.
21. Wang L., et al. Aerodynamic modeling of counter-rotating wind turbines, *Energy*, 2016.