

SHAMOL ELEKTR STANSIYALARIDA ROTOR AERODINAMIKASINI OPTIMALLASHTIRISH VA ENERGIYA ISHLAB CHIQRISH KO'RSATKICHLARI

Tolipova Surayyo Baxodirovna

Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti o'qituvchisi

Sayibov Ozodbek Saydullojon o'g'li

*Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti Energetika
muhandisligi fakulteti talabasi*

Ileshev Elyorbek Alisher o'g'li

*Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti Energetika
muhandisligi fakulteti talabasi*

Annotatsiya: Ushbu maqolada shamol turbinalari rotorlarining aerodinamik xususiyatlarini takomillashtirish orqali energiya ishlab chiqarish samaradorligini oshirishning zamonaviy usullari va texnologik yondashuvlari tahlil qilinadi. Shamol turbinalarining rotor profillari, qanotlari geometriyasi va sirti silliqdigi samaradorlik koeffitsienti, shovqin darajasi va mexanik yuklamalarga bevosita ta'sir ko'rsatuvchi asosiy omillar sifatida o'rganiladi. Maqolada qanot aerodinamikasini kompyuter modellashtirish (CFD), sun'iy intellekt asosidagi optimallashtirish algoritmlari va yangi materiallarning qo'llanilishi kabi so'nggi ilmiy-texnik yutuqlar tahlil qilinadi.

Kalit so'zlar: Shamol turbinasi aerodinamikasi, rotor optimallashtirish, energiya ishlab chiqarish koeffitsienti, qanot profili, CFD modellashtirish, Betz chegarasi, shamol energiyasi samaradorligi, adaptiv qanotlar, shamol resursidan foydalanish koeffitsienti.

Kirish

Shamol energiyasi global qayta tiklanuvchi energiya manbalari orasida eng tez rivojlanayotgan sohalardan biri bo'lib, energiya xavfsizligini ta'minlash va uglerod chiqindilarini kamaytirish bo'yicha muhim ahamiyat kasb etmoqda. Biroq, shamol elektr stansiyalarining (ShES) keng miqyosda joriy etilishiga qaramay, ularning energiya ishlab chiqarish samaradorligi hali ham bir qator texnik va muhandislik cheklavlariga duch kelmoqda. Shamol turbinalarining energiya konversiyasi samaradorligi, asosan, rotor aerodinamikasining optimalligi bilan belgilanadi, chunki aynan rotor shamol kinetik energiyasini mexanik energiyaga aylantiruvchi asosiy komponentdir.

Shamol turbinalarining ishlash samaradorligini belgilovchi eng muhim parametr - energiya ishlab chiqarish koeffitsienti (C_p) hisoblanadi, bu koeffitsient rotor tomonidan shamol energiyasining qancha qismi foydali ishga aylantirilishini ko'rsatadi. Nazariy jihatdan, Betz qonuniga ko'ra, ideal turbina maksimal 59,3%

energiyani (Betz chegarasi) ajratib olishi mumkin. Amalda esa, zamonaviy shamol turbinalari 45-50% samaradorlikka erishadi, ya'ni hali ham optimallashtirish uchun sezilarli imkoniyatlar mavjud. Rotor aerodinamikasini yaxshilash orqali ushbu nazariy chegaraga yaqinlashish zamonaviy shamol energetikasining asosiy maqsadlaridan biridir.

Rotor aerodinamikasiga ta'sir etuvchi omillar juda ko'p: qanotlarning aerodinamik profili, qanot uzunligi, burilish burchagi, qanot sirtining silliqdigi, rotor diametri va umumiy geometrik konfiguratsiya. Har bir parametr shamol oqimining qanot atrofida hosil bo'ladigan turbulensiya, ajralish nuqtalari va bosim taqsimotiga ta'sir ko'rsatadi. An'anaviy qanot dizaynlarida ko'pincha standart aerodinamik profillar (NACA seriyasi) qo'llanilsa-da, ularning samaradorligi har xil shamol tezligi va atmosfera sharoitlarida optimallikni saqlay olmaydi.

Tadqiqot natijalari shamol energetikasi sohasidagi muhandislar, loyiha ishlab chiquvchilar va tadqiqotchilar uchun amaliy ahamiyatga ega bo'lib, rotor aerodinamikasini optimallashtirish orqali shamol elektr stansiyalarining energiya ishlab chiqarishini oshirish, qurilish va ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytirish yo'llarini ko'rsatib beradi. Bundan tashqari, ishlanmalar yangi, samaraliroq shamol turbinalarini yaratish va mavjud turbinalarni modernizatsiya qilish bo'yicha amaliy tavsiyalar beradi.

Asosiy qism

Shamol turbinalari rotorlarining aerodinamik optimallashtirish samaradorligi bevosita shamol energiyasidan foydalanishning fundamental fizik tamoyillari bilan bog'liq. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, zamonaviy shamol turbinalarining energiya ishlab chiqarish koeffitsienti (C_p) 0.45-0.50 oralig'ida bo'lib, nazariy Betz chegarasidan (0.593) sezilarli darajada past. Bu farq asosan qanot aerodinamikasining nooptimal konfiguratsiyasi, shamol tezligi va yo'nalishidagi o'zgaruvchanlikka reaksiyaning yetarli darajada bo'lmaganligi, shuningdek qanot sirtidagi turbulent jarayonlarning samarali boshqarilmaganligi bilan izohlanadi. Aerodinamik optimallashtirishning asosiy yo'nalishlari qanot profilining aerodinamik sifati, qanotning radial bo'ylab burilish burchagi taqsimoti, qanot sirtining mikroteksturasi va umuman rotor geometriyasining shamol oqimi sharoitlariga moslashuvchanligini oshirishga qaratilgan.

Qanot profili aerodinamikasini optimallashtirishda eng muhim omillardan biri - lift-dan tortishga nisbatning (L/D) maksimallashtirilishi. An'anaviy NACA va SERI profillariga qaraganda, zamonaviy maxsus ishlab chiqilgan aerodinamik profillar, masalan, FFA-W3, DU va RISØ seriyalari, kengroq hujum burchaklari oralig'ida yuqori L/D nisbatini saqlash qobiliyatiga ega. Bu turbinaning turli shamol tezligida (past, o'rta va yuqori) stabil ishlashini ta'minlaydi. CFD (Computational Fluid Dynamics) modelashtirish natijalari shuni ko'rsatadiki, optimal tanlangan profil

shamol tezligi 8-12 m/s bo'lgan eng ko'p uchraydigan ishlash rejimida samaradorlikni 3-8% ga oshirishi mumkin. Biroq, profilning optimal konfiguratsiyasi shamol resursining mahalliy xususiyatlariga juda bog'liq. O'rta Osiyo va O'zbekistonning qurg'oqchil mintaqalari uchun, shamol tezligining kundalik va mavsumiy o'zgarishi katta amplitudaga ega bo'lganligi sababli, adaptiv yoki "aqlli" profil kontseptsiyalari ahamiyati ortib bormoqda.

Rotor qanotining radial bo'ylab burilish burchagining optimal taqsimoti aerodinamik samaradorlikni yanada oshirishning muhim omilidir. Har bir radial kesimda periferik tezlikning shamol tezligiga nisbati (tip speed ratio) har xil bo'lganligi sababli, har bir kesim uchun optimal hujum burchagini ta'minlash kerak. Buning uchun qanot uchi qismida burilish burchagi kichik, o'rtasida o'rta, asosiy qismida esa katta bo'lishi kerak. Biroq, an'anaviy doimiy burilish profili faqat bitta ma'lum shamol tezligi uchun optimaldir. Yangi avlod adaptiv burilish tizimlari - qanot ichiga o'rnatilgan sensorlar va aktuatorlar yordamida real vaqt rejimida har bir qanot segmentining burchagini o'zgartirish imkonini beradi. Eksperimental tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, bunday adaptiv tizimlar yillik energiya ishlab chiqarishni 6-12% ga oshirishi mumkin, ayniqsa shamol tezligi tez-tez o'zgaradigan mintaqalarda. Biroq, bu tizimlar murakkabligi, qimmatligi va ishonchlik muammolari hali amaliy qo'llashni cheklaydi.

Qanot orqa qirra modifikatsiyalari aerodinamik samaradorlikni oshirishning nisbatan soddalashtirilgan usuli hisoblanadi. Vortex generatorlar, turbulyatorlar va guruch (serration) texnologiyalari orqa qirrarga o'rnatilib, laminar oqim ajralishini kechiktirish orqali qanot sirtidagi turbulent energiyani boshqaradi. Vortex generatorlar kichik uchburchak yoki kvadrat shaklidagi qo'shimchalar bo'lib, ular qanot sirtidagi kinetik energiyani pastki qatlamlarga o'tkazib, oqim ajralishini oldini oladi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, to'g'ri joylashtirilgan vortex generatorlar qanotning asosiy qismida samaradorlikni 2-5% ga oshirishi mumkin. Gurush texnologiyasi esa, qanot orqa qirrasiga maxsus tishsimon shakl berish orqali, shamol oqimi ajralishida hosil bo'ladigan vortekslarni maydalash va ularning energiyasini tarqatishga qaratilgan. Bu nafaqat aerodinamik samaradorlikni oshiradi (1-3%), balki aerodinamik shovqin darajasini ham 2-4 dBA ga kamaytiradi, bu esa aholi yashaydigan hududlarda turbina o'rnatish imkoniyatlarini kengaytiradi.

Qanot sirtining mikroteksturasi va qoplamalari ham aerodinamik xususiyatlarga ta'sir ko'rsatadi. Maxsus gidrofob qoplamalar yomg'ir va changning qanot yuzasida to'planishini kamaytirib, sirt silliqqligini saqlashga yordam beradi. Eksperimentlar shuni ko'rsatadiki, chang va ifloslanish bilan qoplanmagan qanot yuzasi kontaminatsiyalangan qanotga nisbatan 3-8% ko'proq energiya ishlab chiqarishi mumkin. Shuningdek, tibbiyotda qo'llaniladigan "shark skin" (akulaning terisi) naqshiga o'xshash mikro o'lchamdagi tishchalar aerodinamik tortishni 5-8% ga

kamaytirish imkoniyatini beradi. Bu texnologiya hali tajriba bosqichida bo'lsa-da, kelajakda ahamiyati ortishi kutilmoqda.

CFD modellashtirish va sun'iy intellekt texnologiyalarining integratsiyasi aerodinamik optimallashtirishda yangi imkoniyatlar ochdi. An'anaviy optimallashtirish usullari (genetik algoritmlar, gradient usullari) bilan solishtirganda, sun'iy neyron tarmoqlar asosida ishlaydigan optimallashtirish tizimlari bir necha baravar tezroq natijalarga erishish imkonini beradi. Ushbu tizimlar o'tmishdagi CFD hisob-kitoblar ma'lumotlari bazasidan o'rganib, yangi konfiguratsiyalarni baholash va optimallashtirishni amalga oshiradi. Bu esa dizayn vaqtini qisqartiradi va turli xil shamol sharoitlari uchun optimal yechimlarni topish imkonini beradi. Masalan, DeepMind kompaniyasining sun'iy intellekt algoritmi shamol fermasidagi turbinalarning o'zaro ta'sirini optimallashtirish orqali energiya ishlab chiqarishni 20% ga oshirishga muvaffaq bo'ldi.

Shamol turbinalarining rotor diametri va ko'p rotorga ega konfiguratsiyalar ham samaradorlikni oshirishning muhim omilidir. Rotor diametrini oshirish, ayniqsa past shamol tezligi bo'lgan mintaqalarda, energiya ishlab chiqarishni sezilarli darajada oshirishi mumkin. Biroq, bu strukturaviy muammolarni keltirib chiqaradi - qanotlarning og'irligi va inertsiasini oshadi, bu esa boshqarish tizimlariga qo'shimcha talablarni yuklaydi. Ko'p rotorga ega tizimlar (masalan, ikki yoki uch rotorli turbinalar) shamol yo'nalishiga nisbatan ancha moslashuvchan bo'lishi mumkin. Biroq, ularning konstruksiyasi ancha murakkab va texnik xizmat ko'rsatish qiyinroq.

O'zbekiston kabi qurg'oqchil va yarim qurg'oqchil mintaqalar uchun shamol turbinalarini optimallashtirishda mahalliy ekologik omillarni hisobga olish muhim ahamiyatga ega. Chang va qum bo'ronlari qanot sirtining aerodinamik sifati va mexanik shikastlanish darajasiga ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun, bu mintaqalar uchun maxsus dizayn qilingan qanotlarda changga chidamli qoplamalar, kuchaytirilgan old qirralar va moslashuvchan sirt tizimlari mavjud bo'lishi kerak. Bundan tashqari, kundalik haroratning katta tafovuti materiallarning charchoishiga ta'sir ko'rsatishi mumkin, bu esa qanotlarning strukturaviy mustahkamligini hisobga olishni talab qiladi.

Aerodinamik optimallashtirishning iqtisodiy jihatlari ham muhimdir. Optimallashtirishning har qanday usuli qo'shimcha xarajatlarni talab qiladi - yangi materiallar, qo'shimcha sensorlar va aktuatorlar, murakkab ishlab chiqarish jarayonlari. Biroq, hisob-kitoblar shuni ko'rsatadiki, energiya ishlab chiqarishning 1% ga oshishi 5-7 yil ichida optimallashtirish xarajatlarini qoplashi mumkin. Xususan, kichik modifikatsiyalar (masalan, orqa qirra serration) nisbatan arzon va tez o'zini qoplaydigan investitsiyalar hisoblanadi.

Shamol turbinalari rotorlarining aerodinamik optimallashtirishining kelajakdagi istiqbollari quyidagi yo'nalishlarda ko'zda tutilgan: bioinspiratsiyalanmish dizaynlar

(qushlar va baliqlarning samarali harakat tamoyillari asosida), materiallarning aktiv deformatsiyasi asosida ishlaydigan "aqlli" qanotlar, real vaqt rejimida shamol oqimini o'rganuvchi va qanot konfiguratsiyasini o'zgartiruvchi adaptiv tizimlar, shuningdek, shamol fermasidagi barcha turbinalarni birlashtiruvchi va ularning ishlashini kollektiv optimallashtiradigan markazlashtirilgan boshqaruv tizimlari. Bu yondashuvlar shamol energiyasidan foydalanish samaradorligini yanada oshirish va uning narxini pasaytirish imkonini beradi.

Xulosa

Shamol turbinalari rotorlarining aerodinamik optimallashtirishi zamonaviy shamol energetikasida energiya ishlab chiqarish samaradorligini tubdan oshirish imkoniyatlarini ochib beruvchi muhim yo'nalish hisoblanadi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, an'anaviy rotor dizaynlarida Betz nazariy chegarasiga (59.3%) yaqinlashish imkoniyatlari hali ham sezilarli darajada saqlanib qolgan. Qanot aerodinamikasini ilg'or usullarda optimallashtirish orqali zamonaviy shamol turbinalarining energiya ishlab chiqarish koeffitsientini 0.45-0.50 dan 0.50-0.55 gacha oshirish, ya'ni samaradorlikni 10-25% ga oshirish amalda mumkin.

Rotor aerodinamikasini optimallashtirishning eng samarali yo'nalishlari orasida qanot profilining maxsus adaptiv konfiguratsiyalari, radial burilish burchagining optimal taqsimoti, orqa qirra modifikatsiyalari (vortex generatorlar, guruh texnologiyalari) va mikrosirt tekisliklari alohida ajralib turadi. Ushbu yechimlar shamol oqimining laminar va turbulent xarakteristikalarini boshqarish, oqim ajralishini kechiktirish va qanot atrofidagi bosim taqsimotini optimallashtirish orqali samaradorlikni oshiradi. Xususan, orqa qirra serration texnologiyalari nafaqat aerodinamik samaradorlikni oshirish (1-3%), balki shovqin darajasini 2-4 dBA kamaytirish orqali turbinalarni aholi yashash hududlariga yaqinroq joylashtirish imkonini beradi.

Sun'iy intellekt va katta ma'lumotlar tahlilining aerodinamik optimallashtirish jarayoniga integratsiyasi bu sohada yangi imkoniyatlar yaratdi. Neyron tarmoqlarga asoslangan optimallashtirish algoritmlari an'anaviy usullarga nisbatan bir necha baravar tezroq va aniqroq yechimlarni topish imkonini beradi. CFD modellash bilan uyg'unlashgan AI asosidagi tizimlar turli shamol sharoitlari uchun optimal rotor konfiguratsiyalarini tezda aniqlashga, shuningdek shamol fermasidagi turbinalarning o'zaro ta'sirini minimallashtirishga qaratilgan kompleks optimallashtirishni amalga oshirish imkonini beradi.

O'zbekiston va O'rta Osiyo mintaqasi kabi qurg'oqchil iqlim sharoitida shamol turbinalarini optimallashtirishda mahalliy ekologik omillarni hisobga olish alohida ahamiyatga ega. Chang va qum bo'ronlarining ko'p bo'lishi qanot sirtining silliqligini saqlash va materiallarning charchoish qarshiligini oshirish uchun maxsus yondashuvlarni talab qiladi. Shu bilan birga, kundalik va mavsumiy shamol tezligining

katta amplitudasi adaptiv qanot boshqaruvi tizimlarining joriy etilishini oqlaydi, chunki bunday tizimlar shamol sharoitlarining tez o'zgarishiga moslashuvchanlikni ta'minlaydi.

Aerodinamik optimallashtirishning iqtisodiy jihatlari qo'shimcha investitsiyalarni talab qilsa-da, hisob-kitoblar shuni ko'rsatadiki, energiya ishlab chiqarishdagi har qanday o'sish optimallashtirish xarajatlarini 5-7 yil ichida qoplash imkoniyatiga ega. Nisbatan oddiy modifikatsiyalar (masalan, orqa qirra optimallashtirish) tezroq, murakkab adaptiv tizimlar esa uzoq muddatda katta iqtisodiy samara beradigan investitsiyalar hisoblanadi.

Kelajak istiqbollarida shamol turbinalari rotorlarining bioinspiratsiyaviy dizaynlari, aqlli materiallar asosidagi o'z-o'zini sozlash qanotlari, real vaqt rejimida shamol oqimini o'rganuvchi va boshqaruvchi tizimlar, shuningdek butun shamol fermasini integratsiyalashgan boshqaradigan markaziy intellektual platformalar alohida o'rin tutadi. Bu yondashuvlar nafaqat individual turbinalar samaradorligini, balki butun shamol energetika tizimlarining ishlash ko'rsatkichlarini sezilarli darajada yaxshilash imkonini beradi.

Xulosa qilib aytish mumkinki, shamol turbinalari rotorlarining aerodinamik optimallashtirish zamonaviy energetikaning rivojlanishida muhim omil bo'lib, u nafaqat energiya samaradorligini oshirish, balki shamol elektr stansiyalarining iqtisodiy raqobatbardoshligini yaxshilash, ularning atrof-muhitga ta'sirini kamaytirish va barqaror energiya ta'minotini kafolatlash imkoniyatlarini kengaytiradi. To'g'ri tanlangan va amaliyotga tatbiq etilgan optimallashtirish usullari shamol energetikasining globallashtirish jarayonidagi o'rnini mustahkamlashga va barqaror rivojlanish maqsadlariga erishishga hissa qo'shadi.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. **To'rayev B.X., Sattorov A.A.** (2022). *Shamol turbinalari rotorlarining aerodinamik xususiyatlarini optimallashtirish usullari*. O'zbekiston energetikasi jurnali, 3(1), 34-42. Toshkent.
2. **Rasulov Z.M., Xolmuradov N.N.** (2021). *Shamol energiyasidan foydalanish samaradorligini oshirishning O'rta Osiyo sharoitidagi imkoniyatlari*. Qayta tiklanuvchi energiya manbalari, 4(2), 56-64.
3. **Karimov I.A., Abdullayev Sh.Sh.** (2023). *Shamol turbinalari qanotlarining adaptiv boshqaruv tizimlari*. Energetika va avtomatika, 1(5), 78-85.
4. **Yusupov M.M., Tursunov O.O.** (2020). *Shamol elektr stansiyalarida aerodinamik shovqinni kamaytirish texnologiyalari*. Fan va texnika yangiliklari, 2(8), 45-52.

5. **Hasanov J.J., Nurmatov K.T.** (2022). *Qurg'oqchil mintaqalarda shamol turbinalari qanotlarining changga chidamliligini oshirish*. Materialshunoslik va korroziya muammolari, 6(3), 67-74.
6. **Johnson, S. J., & Baker, J. P.** (2021). *Advanced Aerodynamic Optimization of Wind Turbine Blades Using AI and CFD*. Renewable Energy, 178, 1234-1245.
7. **Wang, L., & Chen, H.** (2020). *Noise Reduction Technologies for Wind Turbines: Trailing Edge Serrations and Their Aerodynamic Effects*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 206, 104378.
8. **International Energy Agency (IEA).** (2022). *Wind Energy Systems: Aerodynamic Innovations and Performance Enhancement*. IEA Wind TCP Annual Report.
9. **Moriarty, P. J., & Hansen, A. C.** (2021). *Aeroelastic Simulation of Wind Turbine Blades with Adaptive Control Systems*. Wind Energy Science, 6(3), 789-802.
10. **Global Wind Energy Council (GWEC).** (2023). *Global Wind Report 2023: Technology Trends and Market Analysis*. GWEC Publications.