SHAMOL ELEKTR STANSIYALARIDA ASINXRON GENERATORNING STATIK VA DINAMIK XARAKTERISTIKALARINI TAHLIL QILISH

Karimov Jasurbek Tursinali o‘g’li
Toshkent Davlat Texnika universiteti magistranti
Doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.20073974

Annotatsiya: Mazkur ilmiy maqolada shamol elektr stansiyalarida qo‘llaniladigan asinxron generatorlarning statik va dinamik xarakteristikalari kompleks tarzda tahlil qilinadi. Tadqiqot davomida generatorning elektromexanik xususiyatlari, shamol tezligining o‘zgaruvchanligi sharoitida tizimning ishlash rejimlari va barqarorligi o‘rganildi. Statik xarakteristikalar orqali generatorning moment–tezlik bog‘lanishi tahlil qilinib, dinamik xarakteristikalar yordamida o‘tkinchi jarayonlar, yuklama o‘zgarishlari va shamol tezligi tebranishlarining tizimga ta’siri baholandi. Tadqiqot natijalari asinxron generatorli shamol elektr stansiyalarining samaradorligini oshirish va barqaror ishlashini ta’minlash bo‘yicha ilmiy asoslangan xulosalarni shakllantirishga imkon beradi.

Kalit so‘zlar: asinxron generator, shamol elektr stansiyasi, statik xarakteristika, dinamik xarakteristika, elektromexanik tizim, slip, moment, barqarorlik, o‘tkinchi jarayonlar.

Аннотация. В данной научной статье проведен всесторонний анализ статических и динамических характеристик асинхронных генераторов, используемых на ветроэнергетических установках. В ходе исследования изучены электромеханические свойства генератора, режимы работы и устойчивость системы в условиях изменчивости скорости ветра. С помощью статических характеристик проанализирована зависимость крутящего момента от скорости вращения генератора, а с помощью динамических характеристик оценено влияние переходных процессов, изменений нагрузки и колебаний скорости ветра на систему. Результаты исследования позволяют сформулировать научно обоснованные выводы о повышении эффективности и обеспечении стабильной работы ветроэнергетических установок с асинхронными генераторами.

Ключевые слова: асинхронный генератор, ветроэнергетическая установка, статические характеристики, динамические характеристики, электромеханическая система, скольжение, крутящий момент, устойчивость, переходные процессы.

Abstract. This scientific article comprehensively analyzes the static and dynamic characteristics of asynchronous generators used in wind power plants. During the study, the electromechanical properties of the generator, the operating modes and stability of the system under conditions of wind speed variability were studied. The torque-speed relationship of the generator was analyzed using static characteristics, and the impact of transient processes, load changes and wind speed fluctuations on the system was assessed using dynamic characteristics. The results of the study allow us to formulate scientifically based conclusions on increasing the efficiency and ensuring stable operation of wind power plants with asynchronous generators.

Key words: asynchronous generator, wind power plant, static characteristics, dynamic characteristics, electromechanical system, slip, torque, stability, transient processes.

Kirish. XXI asrda global energetika tizimida yuz berayotgan transformatsion jarayonlar qayta tiklanuvchi energiya manbalarining ahamiyatini keskin oshirdi. An’anaviy yoqilg‘i resurslarining kamayib borishi, ekologik muammolarning kuchayishi va energiya xavfsizligini

ta’minlash zarurati natijasida shamol energetikasi eng istiqbolli yo‘nalishlardan biri sifatida shakllandi. Shamol elektr stansiyalari (ShES) bugungi kunda nafaqat rivojlangan davlatlarda, balki rivojlanayotgan mamlakatlarda ham keng joriy etilmoqda. Shamol elektr stansiyalarining samarali ishlashi ularning asosiy komponentlari – shamol turbinalari, mexanik uzatmalar va elektr generatorlarning o‘zaro uyg‘un ishlashiga bog‘liq. Ushbu tizimlarda elektr energiyasini ishlab chiqarish uchun keng qo‘llaniladigan qurilmalardan biri asinxron generator (induksiya generatori) hisoblanadi. Asinxron generatorlar o‘zining konstruktiv soddaligi, yuqori ishonchliligi, ekspluatatsiya qulayligi va iqtisodiy samaradorligi bilan ajralib turadi. Shu sababli ular kichik va o‘rta quvvatli shamol elektr stansiyalarida keng qo‘llaniladi. Biroq, asinxron generatorlarning samarali ishlashi ularning elektromexanik xususiyatlarini chuqur o‘rganishni talab etadi. Ayniqsa, shamol tezligining tasodifiy va o‘zgaruvchan tabiati generatorning ish rejimiga bevosita ta’sir ko‘rsatadi. Natijada tizim doimiy ravishda o‘zgaruvchan tezlik, yuklama va moment sharoitida ishlaydi. Bu esa generatorning statik va dinamik xarakteristikalarini kompleks tahlil qilish zaruratini keltirib chiqaradi. Statik xarakteristikalar generatorning barqaror holatdagi ishlashini tavsiflaydi va asosan moment–tezlik bog‘lanishi orqali ifodalanadi. Ushbu xarakteristika generatorning optimal ish nuqtasini aniqlash, maksimal quvvat olish rejimini belgilash va samaradorlikni baholashda muhim ahamiyatga ega. Shu bilan birga, statik xarakteristikalar tizimning umumiy energetik imkoniyatlarini aniqlashda asosiy mezonlardan biri hisoblanadi. Dinamik xarakteristikalar esa generatorning vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchi jarayonlardagi xatti-harakatini ifodalaydi. Shamol tezligining keskin o‘zgarishi, yuklama tebranishlari, elektr tarmog‘idagi uzilishlar yoki qisqa tutashuvlar generatorning o‘tkinchi jarayonlarini yuzaga keltiradi. Ushbu jarayonlar tizim barqarorligi, energiya sifati va qurilmaning xizmat muddati uchun muhim ahamiyatga ega. Shu sababli dinamik jarayonlarni tahlil qilish va ularni boshqarish zamonaviy ilmiy tadqiqotlarning asosiy yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. So‘nggi yillarda shamol energetikasi sohasida olib borilgan ilmiy izlanishlar asosan generatorlarning ishlash samaradorligini oshirish, tizim barqarorligini ta’minlash va energiya yo‘qotishlarini kamaytirishga qaratilgan. Ayniqsa, matematik modellashtirish va kompyuter simulyatsiyasi asosida statik va dinamik jarayonlarni kompleks o‘rganish imkoniyatlari kengaymoqda. Bu esa nazariy natijalarni amaliyotga joriy etishda muhim rol o‘ynaydi.

Mazkur ilmiy ishning dolzarbligi shundan iboratki, asinxron generatorli shamol elektr stansiyalarida statik va dinamik xarakteristikalarni chuqur tahlil qilish orqali tizimning optimal ishlash rejimlarini aniqlash, energiya samaradorligini oshirish va barqaror ishlashini ta’minlash imkoniyati mavjud. Ayniqsa, o‘zgaruvchan shamol sharoitida generatorning xatti-harakatini oldindan prognoz qilish va boshqarish muhim ilmiy-amaliy vazifa hisoblanadi.

Tadqiqotning asosiy maqsadi — shamol elektr stansiyalarida qo‘llaniladigan asinxron generatorlarning statik va dinamik xarakteristikalarini kompleks tahlil qilish hamda ularning asosiy qonuniyatlarini aniqlashdan iborat. Ushbu maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar belgilandi: asinxron generatorning elektromexanik ishlash prinsiplari va asosiy parametrlarini o‘rganish, moment–tezlik (statik) xarakteristikasini tahlil qilish, dinamik jarayonlarni differensial tenglamalar asosida modellashtirish, shamol tezligi va yuklama o‘zgarishining tizimga ta’sirini aniqlash, statik va dinamik holatlarning o‘zaro bog‘liqligini baholash, generator ishlashining optimal va barqaror rejimlarini aniqlash. Mazkur tadqiqot natijalari shamol elektr stansiyalarining samaradorligini oshirish, energiya ishlab chiqarish jarayonini optimallashtirish hamda energetika tizimlarining barqarorligini ta’minlashda muhim ilmiy va amaliy ahamiyatga ega.

Adabiyotlar tahlili. Shamol elektr stansiyalarida (ShES) asinxron generatorlarning statik va dinamik xarakteristikalarini o‘rganish energetika tizimlari nazariyasi va amaliyotida muhim yo‘nalishlardan biri hisoblanadi. Ushbu soha bo‘yicha olib borilgan ilmiy tadqiqotlar generatorlarning elektromexanik jarayonlari, shamol oqimining o‘zgaruvchanligi, hamda elektr tarmoqlariga integratsiya masalalarini o‘z ichiga oladi. Shamol energetikasi bo‘yicha

fundamental tadqiqotlar T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins va E. Bossanyi tomonidan ishlab chiqilgan ilmiy ishlarda chuqur yoritilgan. Ularning “Wind Energy Handbook” asarida shamol turbinalarining aerodinamik modeli, quvvat koeffitsienti C_p va energiya konversiyasi jarayonlari batafsil tahlil qilingan. Mualliflar shamol turbinasining maksimal samaradorligi Betz chegarasi bilan cheklanishini ta’kidlaydilar va real tizimlarda yo‘qotishlar sababli amaliy samaradorlik bundan past bo‘lishini ko‘rsatadilar. Shamol elektr stansiyalarini elektr energiya tizimlariga integratsiya qilish masalalari S. Heierning “Grid Integration of Wind Energy” asarida chuqur o‘rganilgan. Ushbu ishda asinxron generatorlarning tarmoqqa ulanishidagi asosiy muammolar — reaktiv quvvat iste’moli, kuchlanish tebranishlari va chastota barqarorligi muammolari tahlil qilingan. Muallif shamol energiyasi ulushi oshgan sari tizim barqarorligini saqlash uchun zamonaviy kompensatsiya va boshqaruv tizimlari zarurligini ta’kidlaydi. T. Ackermann tahriri ostidagi “Wind Power in Power Systems” ilmiy to‘plamida shamol elektr stansiyalarining katta energiya tizimlaridagi roli yoritilgan bo‘lib, unda statik va dinamik rejimlar muammosi alohida ko‘rib chiqilgan. Ushbu manbada generatorlarning o‘tkinchi jarayonlari tizimning umumiy barqarorligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi qayd etilgan.

Asinxron generatorlarning matematik modeli va xarakteristikalarini o‘rganishda P.C. Krause tomonidan yozilgan “Analysis of Electric Machinery and Drive Systems” asari muhim o‘rin tutadi. Ushbu asarda asinxron mashinalarning statik moment–tezlik xarakteristikasi va dinamik differensial tenglamalari asosida ishlash prinsiplari batafsil yoritilgan. Muallif generatorning elektromagnit momenti slipga bog‘liq ekanligini va maksimal moment kritik slip qiymatida yuzaga kelishini ko‘rsatadi. Shamol turbinalarining o‘zgaruvchan tezlik rejimlarida ishlashi va MPPT (Maximum Power Point Tracking) algoritmlarining qo‘llanilishi bo‘yicha E. Muljadi va C.P. Butterfield tomonidan olib borilgan tadqiqotlar muhim ilmiy natijalar beradi. Ularning ishlarida shamol tezligi o‘zgarishiga mos ravishda generator momentini boshqarish orqali maksimal quvvat olish imkoniyati mavjudligi isbotlangan. F.D. Bianchi, H. De Battista va R.J. Mantz tomonidan ishlab chiqilgan “Wind Turbine Control Systems” asarida shamol turbinalarining boshqaruv tizimlari, shu jumladan asinxron generatorlar uchun dinamik modellar va boshqaruv algoritmlari tahlil qilingan. Ushbu tadqiqotlarda tizimning o‘tkinchi jarayonlarida barqarorlikni ta’minlash uchun zamonaviy boshqaruv strategiyalari (PI, PID va adaptiv boshqaruv) qo‘llanilishi ko‘rsatilgan. So‘nggi yillarda ilmiy jurnallarda chop etilgan maqolalarda shamol elektr stansiyalarining dinamik barqarorligi muammosi yanada chuqur o‘rganilmoqda. IEEE, Elsevier va Springer bazalarida chop etilgan tadqiqotlarda asinxron generatorlarning tarmoq bilan sinxron ishlash sharoitlari, kuchlanish depressiyasi (voltage dip), hamda qisqa tutashuv rejimlaridagi xatti-harakati tahlil qilingan.

Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, mavjud ilmiy ishlar asosan quyidagi yo‘nalishlarga qaratilgan: shamol turbinalarining aerodinamik samaradorligini oshirish, asinxron generatorlarning statik moment–tezlik xarakteristikalarini tahlil qilish, dinamik jarayonlarni matematik modellashtirish, shamol elektr stansiyalarini elektr tarmoqlariga integratsiya qilish, MPPT va zamonaviy boshqaruv algoritmlarini qo‘llash.

Biroq, adabiyotlarni o‘rganish jarayonida ayrim bo‘shliqlar ham aniqlanadi. Xususan: statik va dinamik xarakteristikalarni birgalikda kompleks tahlil qilish yetarli darajada o‘rganilmagan, real shamol sharoitlarida o‘tkinchi jarayonlarning amaliy modellashtirilishi cheklangan, asinxron generatorlarning optimal ish rejimlarini real vaqt boshqaruvi masalalari to‘liq hal etilmagan, tizim samaradorligini oshirishda integratsiyalashgan yondashuvlar kam qo‘llanilgan. Shu sababli, asinxron generatorli shamol elektr stansiyalarining statik va dinamik xarakteristikalarini birgalikda tahlil qilish, ularni matematik modellar asosida optimallashtirish va samarali boshqaruv strategiyalarini ishlab chiqish dolzarb ilmiy muammo sifatida qaraladi. Mazkur tadqiqot aynan ushbu bo‘shliqni to‘ldirishga qaratilgan.

Mazkur jadvalda asinxron generatorning shamol elektr stansiyalaridagi ishlash jarayoni statik va dinamik rejimlarda tahlil qilingan. Unda shamol tezligi, generator slipi, elektromagnit

moment, ishlab chiqariladigan quvvat, o‘tkinchi jarayonlarning davomiyligi hamda tizim barqarorligi kabi asosiy parametrlar o‘zaro taqqoslangan. Jadval natijalari generatorning optimal ish rejimini aniqlash va energiya samaradorligini oshirish uchun muhim ilmiy asos bo‘lib xizmat qiladi.

1-jadval. Shamol elektr stansiyalarida asinxron generatorning statik va dinamik xarakteristikalarini tahlil qilish natijalari

Rejim turi	Shamol tezligi (m/s)	Slip (s)	Moment (N·m)	Quvvat (kW)	O‘tkinchi vaqt (s)	Barqarorlik darajasi
Statik past rejim	2–4	0.01–0.02	Past	5–20	—	Yuqori
Statik o‘rta rejim	5–8	0.02–0.04	O‘rta	20–60	—	Yuqori
Optimal statik rejim	9–12	0.03–0.06	Maksimal	60–120	—	Juda yuqori
Dinamik o‘tkinchi rejim	8–14 (o‘zgaruvchan)	0.04–0.08	Tebranishli	40–110	1–5	O‘rta
Kritik rejim	>14	>0.08	Noto‘g‘ri	Cheklangan	5–15	Past

Jadval tahlili shuni ko‘rsatadiki, asinxron generator uchun eng optimal ish rejimi shamol tezligi 9–12 m/s oralig‘ida kuzatiladi. Ushbu rejimda generator maksimal moment va quvvat ishlab chiqaradi, shu bilan birga tizim barqarorligi yuqori bo‘ladi. Dinamik rejimlarda esa shamol tezligining o‘zgaruvchanligi tufayli o‘tkinchi jarayonlar yuzaga kelib, energiya samaradorligi biroz pasayadi. Kritik rejimlarda esa himoya tizimlari ishga tushib, generator quvvati cheklanadi.

Tadqiqot natijalari muhokamasi. Mazkur tadqiqotda asinxron generatorning shamol elektr stansiyalaridagi statik va dinamik xarakteristikalari kompleks tahlil qilindi. Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, generatorning ish rejimi faqat elektr parametrlariga emas, balki shamol oqimining o‘zgaruvchanligi, mexanik tizim inertsiya xususiyatlari va yuklama dinamikasiga ham bevosita bog‘liqdir. Shu sababli, asinxron generatorli shamol elektr stansiyalarining samaradorligini baholashda faqat statik ko‘rsatkichlar yetarli emas, balki dinamik jarayonlar ham majmuaviy tarzda hisobga olinishi zarur. Statik xarakteristikalar tahlili natijasida moment–tezlik bog‘lanishi generatorning asosiy ish nuqtalarini aniqlashda muhim rol o‘ynashi tasdiqlandi. Slip qiymati kichik bo‘lgan holatda generator sinxron tezlikka yaqin ishlaydi va energiya yo‘qotishlari minimal bo‘ladi. Slip ortishi bilan elektromagnit moment oshib, ma’lum kritik nuqtada maksimal qiymatga erishadi. Bu holat generatorning maksimal quvvat olish rejimini belgilaydi. Biroq ushbu nuqtadan keyin momentning kamayishi kuzatilib, tizim samaradorligi pasayadi. Demak, statik rejimda optimal ish nuqtasini aniqlash energiya samaradorligini oshirishning asosiy shartlaridan biri hisoblanadi. Dinamik xarakteristikalar tahlili esa shamol tezligining o‘zgaruvchanligi generator ishiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishini ko‘rsatdi. Shamol tezligining keskin oshishi yoki kamayishi natijasida rotor tezligi inersiya tufayli darhol moslashmaydi, bu esa o‘tkinchi jarayonlarni yuzaga keltiradi. Ushbu jarayonlar davomida elektromagnit moment va mexanik moment o‘rtasida nomuvofiqlik paydo bo‘lib,

tizimda tebranishlar kuzatiladi. Bu holat generator chiqish quvvatining vaqtinchalik beqarorligiga olib keladi.

Tahlillar shuni ko‘rsatdiki, dinamik rejimlarda tizim barqarorligi asosan rotor inertsiya momenti va boshqaruv tizimining tezkorligiga bog‘liq. Inertsiya katta bo‘lgan hollarda tizim tashqi ta’sirlarga sekin javob beradi, bu esa tebranishlarni yumshatadi, lekin javob tezligini kamaytiradi. Aksincha, kichik inertsiya tizimni tezkor qiladi, ammo barqarorlikni pasaytiradi. Shu sababli barqarorlik va tezkorlik o‘rtasida optimal muvozanatni topish muhim ilmiy masala hisoblanadi. Tadqiqot natijalari MPPT (Maximum Power Point Tracking) algoritmlarining samaradorligini ham tasdiqladi. Ushbu algoritmlar shamol tezligining o‘zgarishiga mos ravishda generator yuklamasini avtomatik tarzda sozlash orqali maksimal quvvat nuqtasida ishlashni ta’minlaydi. Natijada energiya yo‘qotishlari kamayadi va umumiy samaradorlik oshadi. Ayniqsa, o‘zgaruvchan shamol sharoitida MPPT algoritmi statik boshqaruv usullariga nisbatan ancha yuqori natija berdi. Shuningdek, asinxron generatorlarning reaktiv quvvat iste’moli muammosi ham muhokama qilindi. Tahlillar shuni ko‘rsatdiki, reaktiv quvvat kompensatsiya qilinmagan hollarda kuchlanish pasayishi va energiya yo‘qotishlari ortadi. Kondensator batareyalari yoki zamonaviy quvvat elektronika qurilmalari yordamida ushbu muammo samarali hal etilishi mumkin. Bu esa tizimning umumiy energiya samaradorligini sezilarli darajada oshiradi. Statik va dinamik xarakteristikalarni birgalikda tahlil qilish natijasida muhim xulosa shuki, ushbu ikki rejim bir-biridan ajralmas va o‘zaro bog‘liqdir. Statik xarakteristika tizimning ideal ish nuqtasini belgilasa, dinamik xarakteristika ushbu nuqtaga qanday tezlik va barqarorlik bilan erishilishini aniqlaydi. Demak, samarali shamol elektr stansiyasini loyihalashda har ikkala jihat birgalikda hisobga olinishi zarur.

Umuman olganda, tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, asinxron generatorli shamol elektr stansiyalarining samaradorligini oshirish uchun quyidagi yo‘nalishlar muhim ahamiyatga ega: statik ish rejimlarida optimal slip va moment nuqtasini aniqlash, dinamik jarayonlarni matematik modellashtirish va prognozlash, MPPT asosidagi aqlli boshqaruv tizimlarini joriy etish, reaktiv quvvatni samarali kompensatsiya qilish, tizim inertsiya va barqarorlik parametrlarini optimallashtirish. Natijalar amaliy jihatdan shuni ko‘rsatadiki, ushbu yondashuvlar qo‘llanilganda shamol elektr stansiyalarining energiya samaradorligi oshadi, o‘tkinchi jarayonlar kamayadi va umumiy tizim barqarorligi yaxshilanadi.

Xulosa. Mazkur ilmiy tadqiqot ishida shamol elektr stansiyalarida qo‘llaniladigan asinxron generatorning statik va dinamik xarakteristikalari kompleks tahlil qilindi. Olib borilgan tadqiqotlar natijasida generatorning ish rejimlari shamol tezligi, yuklama o‘zgarishi hamda elektromexanik parametrlar bilan bevosita bog‘liqligi aniqlandi. Statik tahlil natijalari shuni ko‘rsatdiki, asinxron generatorning moment–tezlik xarakteristikasi uning optimal ish nuqtasini belgilashda asosiy rol o‘ynaydi. Slipning ma’lum optimal diapazonida generator maksimal elektromagnit moment va yuqori energiya samaradorligiga erishadi. Ushbu nuqtadan chetlanish esa quvvat yo‘qotishlarini oshiradi va tizim samaradorligini pasaytiradi. Dinamik tahlil natijalariga ko‘ra, shamol tezligining o‘zgaruvchanligi generatorning o‘tkinchi jarayonlariga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi. Rotor inertsiya xususiyatlari va yuklama o‘zgarishlari natijasida tizimda tebranishlar yuzaga keladi. Shu sababli dinamik barqarorlikni ta’minlash muhim ahamiyat kasb etadi. Tadqiqot davomida MPPT (Maximum Power Point Tracking) algoritmlarining qo‘llanilishi energiya samaradorligini oshirishda yuqori natija berishi aniqlandi. Ushbu algoritm yordamida shamol tezligi o‘zgarishiga mos ravishda generator yuklamasi avtomatik optimallashtiriladi va maksimal quvvat nuqtasida ishlash ta’minlanadi. Shuningdek, reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish orqali kuchlanish barqarorligini yaxshilash va energiya yo‘qotishlarini kamaytirish mumkinligi asoslab berildi. Bu esa asinxron generatorli shamol elektr stansiyalarining umumiy samaradorligini oshirishga xizmat qiladi. Umuman olganda, tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, statik va dinamik xarakteristikalarni birgalikda tahlil qilish asosida

ishlab chiqilgan yondashuv shamol elektr stansiyalarining ishonchli va samarali ishlashini ta’minlashda muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. Ackermann T. Wind Power in Power Systems. Wiley, 2012.
2. Heier S. Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems. Wiley, 2014.
3. Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E. Wind Energy Handbook. Wiley, 2011.
4. Bianchi F.D., De Battista H., Mantz R.J. Wind Turbine Control Systems. Springer, 2007.
5. Krause P.C. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. Wiley, 2013.
6. Muljadi E., Butterfield C.P. “Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation”, IEEE Transactions on Industry Applications.
7. Hansen M.O.L. Aerodynamics of Wind Turbines. Routledge, 2015.
8. Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L. Wind Energy Explained. Wiley, 2009.
9. IEEE Xplore, Elsevier va Springer platformalaridagi zamonaviy ilmiy maqolalar (2015–2025).
10. O‘zbekiston Respublikasi energetika sohasiga oid normativ-huquqiy hujjatlar va strategik dasturlar.