



ShES lardagi faza rotorli asinxron generatorlarining turli ish rejimlarida quvvat oqimlarini tadqiq etish

Olimjon Z. Toirov¹, Mirzoxid X. Taniyev^{1,a}

¹ DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; olimjon.t@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0458-4878>

^{1,a} PhD, dots., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; tanievmirzohid@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2431-4683>

Dolzarbli: jahonda mavjud tabiiy energiya resurslardan oqilona foydalanish, qayta tiklanuvchi energiya manbalari orqali elektr stansiyalaridagi generatorlarning energiya samaradorligini oshirish, gidroelektr stansiyalaridagi elektromexanik tizimlarni energiya tejankor ish rejimlarini yaratishga alohida ahamiyat berilmoqda. Hozirgi kunda rivojlangan davlatlarda qayta tiklanuvchi energiya manbalaridagi faza rotorli asinxron generatorlar (FRAG)dan foydalanish, elektromexanik tizimni avtomatik boshqarish bo'yicha keng ko'lamli tadqiqotlar olib borilmoqda. Dunyo bo'yicha sha-mol elektr stansiyalarining o'rnatilgan quvvati yiliga 93,6 GVt ga oshib bormoqda, umumiy o'rnatilgan quvvati esa 950 GVt ga yetdi. Bu borada, shamol elektr stansiyalaridagi generatorlarni takomillashtirish, energetik ko'rsatkichlarini yaxshilash, elektromexanik tizimning energiya samaradorligini oshirish dolzarb vazifa hisoblanadi.

Maqsad: qayta tiklanuvchi energiya manbalaridagi FRAG ning keng diapazonda aylanish tezligini rostdash usullarini tahlil qilish, turli shamol tezliklari o'zgarishida qayta tiklanuvchi energiya manbalaridagi FRAG ning aylanish tezligini rostlaydigan avtomatik boshqarish tizimining funksional sxemasini ishlab chiqish, ikki manbali asinxron generator (IMAG) ga asoslangan ShES tezlik diapazoni, sinxron tezlikka nisbatan $\pm 30\%$ ni tashkil qilishini hisobga olgan holda, ShES lardagi IMAG ni energiya samaradorligini, shu bilan birga ularning ishonchlik ko'rsatkichlarini oshirish imkoniyatlarini aniqlashdan iborat.

Usullar: tadqiqot jarayonida rotor va stator quvvatlarini tahlil qilishda matematik modellash va hisoblash usullaridan foydalanildi; FRAG negizida yaratilgan IMAG uchun rotor aylanish tezligi sinxron tezlikdan past va yuqori bo'lgan ikki ish rejimida quvvat oqimlari yo'nalishlari ko'rib chiqildi.

Natijalar: IMAG ning holati uchun stator va rotor chulg'amlarining tok, kuchlanish, magnit oqimlarining birlashtirilgan fazaviy vektor diagrammasi qurildi. Sinxron tezlikdan yuqori va past aylanish holatlari uchun -0,2; -0,1; 0; 0,1; 0,2 sirpanish qiymatlarida stator va rotor aktiv quvvatlari, rotorning reaktiv quvvati, elektromexanik quvvat va generatorning FIK aniqlandi. Shu bilan birga, aniqlangan qiymatlar grafiklari qurildi. Bular orqali ShES lardagi asinxron generatorlarni rotor aylanish tezligi sinxron tezlikdan yuqori aylantirilganda 30 % gacha qo'shimcha quvvat olish imkoniyati mavjudligini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: shamol elektr stansiyasi, faza rotorli asinxron generator, quvvat oqimlari, aktiv quvvat, reaktiv quvvat, quvvat balansi, energiya konversiyasi, ish rejimlari, subsinxron rejim, supersinxron rejim, elektromagnit quvvat almashinuvi, stator va rotor zanjirlari, quvvat taqsimoti, matematik modellash.

Исследование потоков мощности фазороторных асинхронных генераторов на ветровых электростанциях в различных режимах работы

Олимжон З. Тоиров¹, Мирзохид Х. Таниев^{1,a}

¹ DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; olimjon.t@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0458-4878>

^{1,a} PhD, доц., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; tanievmirzohid@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-2431-4683>

Актуальность: в мире особое внимание уделяется рациональному использованию имеющихся природных энергетических ресурсов, повышению энергоэффективности генераторов электростанций за счет возобновляемых источников энергии и созданию энергосберегающих режимов работы электрохимических систем на гидроэлектростанциях. В настоящее время, в развитых странах ведутся масштабные исследования по использованию асинхронных генераторов с фазным ротором (АГФР) на возобновляемых источниках энергии, а также по автоматическому управлению электрохимическими системами. Установленная мощность ветровых электростанций в мире увеличивается на 93,6 ГВт в год, а общая установленная мощность достигла 950 ГВт. В связи с этим актуальной задачей является совершенствование генераторов ветроэлектростанций, улучшение их энергетических показателей и повышение энергоэффективности электрохимической системы.

Цель: анализ методов регулирования частоты вращения АГФР в системах возобновляемой энергетики в широком диапазоне скоростей; разработка функциональной схемы системы автоматического управления скоростью ФРАГ при изменении скорости ветра; определение возможностей повышения энергоэффективности АГДП на ветроэлектростанциях с учётом того, что диапазон регулирования скорости ветроэлектростанции на базе асинхронного генератора двойного питания (АГДП) составляет $\pm 30\%$ относительно синхронной скорости; улучшение показателей их надёжности.

For citation: O.Z. Toirov, M.Kh. Taniyev. Investigation of Power Flows in Wound-Rotor Induction Generators at Wind Power Plants under Various Operating Modes Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3, pp. 203-210.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23242325>

Received: 17.01.2026
Revised: 26.02.2026
Accepted: 18.04.2026
Published: 25.09.2026

Copyright: © Olimjon Z. Toirov, Mirzokhid Kh. Taniyev. 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/>).



Методы: использованы методы математического моделирования и расчетные методы анализа мощностей ротора и статора. Для АГДП, выполненного на базе АГФР, рассмотрены направления потоков мощности при двух режимах работы: при скорости вращения ротора ниже синхронной и при скорости вращения ротора выше синхронной.

Результаты: для режима работы АГДП была построена объединённая фазная (векторная) диаграмма токов, напряжений и магнитных потоков статора и ротора. Для режимов вращения выше и ниже синхронной скорости при значениях скольжения $-0,2$; $-0,1$; 0 ; $0,1$; $0,2$ были определены активные мощности статора и ротора, реактивная мощность ротора, электрохимическая мощность, а также коэффициент полезного действия (КПД) генератора. Кроме того, по полученным данным были построены соответствующие графические зависимости. Проведённый анализ показал, что при работе асинхронных генераторов ветроэлектростанций в режиме сверхсинхронного вращения ротора возможно получение дополнительной мощности до 30 % по сравнению с номинальным режимом.

Ключевые слова: ветровая электростанция (ВЭС), асинхронный генератор с фазным ротором, потоки мощности, активная мощность, реактивная мощность, баланс мощности, преобразователь энергии, режимы работы, синхронный режим, электромагнитный обмен мощностью, цепи статора и ротора, распределение мощности, математическое моделирование.

Investigation of Power Flows in Wound-Rotor Induction Generators at Wind Power Plants under Various Operating Modes

Olimjon Z. Toirov¹, Mirzokhid Kh. Taniev^{1,a)}

¹ DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; olimjon.t@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0458-4878>

^{1a)} PhD, Assoc. prof, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; tanievmirzokhid@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2431-4683>

Relevance: worldwide, considerable attention is being paid to the rational use of existing natural energy resources, improving the energy efficiency of power plant generators through the use of renewable energy sources, and developing energy-saving operating modes for electromechanical systems of hydroelectric power plants. Currently, in developed countries, extensive research is being conducted on the application of wound-rotor induction generators (WRIGs) in renewable energy systems, as well as on automatic control of electromechanical systems. According to global statistics, the installed capacity of wind power plants increases annually by 93.6 GW and has reached 950 GW. In this context, the improvement of wind power plant generators, enhancement of their energy performance, and increase in the energy efficiency of electromechanical systems remain pressing tasks.

Aim: conducting an analysis of methods for controlling the rotational speed of a wound-rotor induction generator (WRIG) in renewable energy systems over a wide speed range; developing a functional diagram of an automatic speed control system for the WRIG under varying wind speeds; and, taking into account that the speed control range of a wind power plant based on a doubly-fed induction generator (DFIG) is $\pm 30\%$ relative to the synchronous speed, determining the possibilities for improving the energy efficiency of the DFIG at wind power plants as well as enhancing its reliability indicators.

Methods: in the course of the study, mathematical modeling and computational methods were employed to analyze the power characteristics of the rotor and stator. For the DFIG based on the WRIG, power flow directions were examined under two operating modes: sub-synchronous and super-synchronous rotor speeds.

Keywords: wind power plant (WPP), wound-rotor induction generator (WRIG) power flows, active power, reactive power, power balance, power converter, operating modes, synchronous operation, electromagnetic power transfer, stator and rotor circuits, power distribution, mathematical modeling.

1. Kirish (Introduction)

Shamol yoki suv oqimining tezligi yordamida faza rotorli asinxron generator (FRAG)ning rotori magnit maydon bilan bir xil yo'nalishda aylaniriladi. Bunday holda, rotorning sirpanishi manfiy ishorada bo'lib, asinxron mashinaning rotorida tormozlovchi moment paydo bo'ladi. Generator energiyani tarmoqqa uzatadi. Generatorning chiqish chulg'amlarida elektr yurituvchi kuch qoldiq magnit maydon hisobiga hosil bo'ladi. Buning uchun kondansatorlar ishlatiladi. Asinxron generatorlar qisqa tutashuvlarga sezgir emas [1]. FRAG sinxron generatorga qaraganda tuzilishi, ish jarayonlari oddiy hisoblanadi. Sinxron generatorlar rotorida induktorlar bo'lib, qo'zg'atish tizimigi o'zgaras tok be-rib, magnit maydon hosil qilinadi. FRAG qo'yidagi afzalliklarga ega. Generatorning chiqish kuchlanishida yuqori garmonikalarda miqdoriy mavjudligini tavsiflovchi kichik garmonik buzilishlar kiradi. Yuqori garmonikalar elektr mashinalarning notekis aylanishiga va meyyordan ortiq qizishiga olib keladi. Sinxron generatorlarda 15% gacha garmonik buzilishlar kuzatilsa, asinxron generatorlarda esa 2% dan oshmaydi [2]. Shunday qilib, asinxron generatorlari amalda faqat foydali energiya hosil qiladi. Faza rotorli asinxron generatorlarni generatorning chiqishida 220/380 V o'zgaruvchan tok bo'lib, u to'g'ridan-to'g'ri iste'molchiga, shuningdek amaldagi tarmoq bilan parallel ishlash uchun ulash mumkin. Bundan tashqari, FRAG amaldagi tarmoq bilan parallel ishlatish uchun tur-li xil o'zgartgichlardan foydalanish kerak bo'lmaydi. Faza rotorli asinxron generatorlarni ShES va

mikroGES larda qo'llashning yana bir afzalligi shundan iboratki, shamol va suv oqimining turlicha tezliklarida rotor zanjiridagi qarshiliklarni boshqarish yorda-mida generator chiqishidagi quvvat va kuchlanish qiymatini o'zgarmas holda saqlab turish imkoniyatini beradi [3]. AGlar ishlatish va texnik xizmat ko'rsatish sodda, qulayligi bilan ajralib turadi, ularni elektr ta'minoti tizimiga integratsiyalashni nisbatan oson amalga oshirish imkoniyati mavjud. 5-100 kVt quvvatga ega AG massasi bir xil quvvatdagi SG massasidan taxminan 1,2-1,3 baravar kam bo'ladi. SG dan farqli o'laroq, asinxron generatorlar sinxronizmdan chiqib ketish xavfiga duch kelmaydilar [4]. Shu bilan birga, AG ning SG ga nisbatan asosiy afzalligi rotor tezligi ma'lum chegarada o'zgarganda uning chiqish kuchlanishining o'zgarmas chastota ega ekanligi, bundan tashqari u tarmoq bilan integratsiyasida barqarorligi bilan tavsiflanadi. Mana shu so'nggi afzallik sababli ShESlar AGLarni qo'llash tobora rivojlanib borayotganligi juda muhim hisoblanadi. Ekspertlar xulosalariga ko'ra, O'zbekistonda qayta tiklanuvchi energiya manbalarining salohiyati 51 mlrd tonna neft ekvivalentiga teng bo'lib, texnik imkoniyatlari esa 182,32 mln. tonna neft ekvivalentini tashkil etar ekan. Bu ko'rsatkich mamlakat bo'yicha yiliga qazib olinadigan birlamchi energetika zahiralarning hozirgi hajmidan uch barobar ko'pdir [5].

2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

IMAG ga asoslangan ShES va mikroGES tezlik diapazoni, sinxron tezlikka nisbatan taxminan $\pm 30\%$ ni tashkil qiladi [6]. Tezlikni bunday diapazonda o'zgarishi odatda shamol va suv oqimining tezligini o'zgartirish uchun barcha shartlarni qondiradi va shuning uchun shamol va suv oqimining o'zgaruvchan tezliklarida SHES va mikroGES larni ishlashi uchun yetarli bo'ladi. Chastota o'zgartirishning quvvati $s = \pm 0,3$ maksimal sirpanishiga va generatorning stator chulg'aming nominal quvvatiga mos keladi. O'zgartirishni generatorning to'liq quvvatiga ega bo'lmagan holda ishlatish ShES narxini, massasini va gabarit o'lchamlarini pasayishiga olib keladi. Ruqsat etilgan tezlikka ega tizimlar bilan solishtirganda, IMAG ga asoslangan ShES ning foydali ish koeffitsiyenti sezilarli darajada oshadi [7-8].

Stator va rotorning aktiv quvvatlari reaktiv quvvatlar bilan birgalikda quyidagi formulalar yordamida hisoblanishi mumkin [9]:

$$P_s = 3 \operatorname{Re} \left\{ \dot{U}_s \dot{I}_s^* \right\}; \quad P_r = 3 \operatorname{Re} \left\{ \dot{U}_r \dot{I}_r^* \right\} \quad (1)$$

$$Q_s = 3 \operatorname{Im} \left\{ \dot{U}_s \dot{I}_s^* \right\}; \quad Q_r = 3 \operatorname{Im} \left\{ \dot{U}_r \dot{I}_r^* \right\} \quad (2)$$

bu yerda $\dot{I}_s^*, \dot{I}_r^*$ - stator va rotor toklarining qo'shma vektorlari.

Rotorda hosil bo'ladigan elektromagnit quvvat - P_m quyidagiga teng:

$$P_m = M_{em} \Omega_m = M_{em} \frac{\omega_m}{p}; \quad (3)$$

bu yerda M_{em} - elektromagnit moment.

Mashina parametrlari va toklariga bog'liq bo'lgan aylantiruvchi moment quyidagicha [9]:

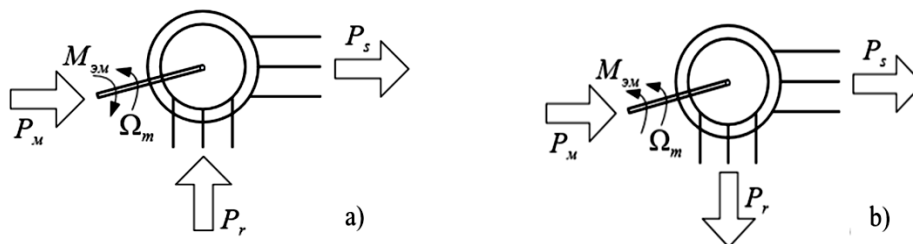
$$M_{em} = 3pL_m \operatorname{Im} \left\{ \dot{I}_r^* \dot{I}_s \right\}. \quad (4)$$

Agar ushbu ifodada oqimlar tenglamalarga muvofiq ifodalansa, aylantiruvchi momentning qo'shimcha ekvivalent ifodalarini olish mumkin [10].

Mashina chulg'aming tarqalish koeffitsiyenti:

$$\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r. \quad (5)$$

FRAG ning har bir zanjiri uchun quvvat oqimlarining yo'nalishlari 1-rasmda ko'rsatilgan.



1-rasm. FRAG modelida quvvat oqimining yo'nalishlari: a) rotor aylanish tezligi sinxron tezlikdan past; b) rotor aylanish tezligi sinxron tezlikdan yuqori

Fig.1. Directions of power flow in the WRIG model: a) rotor speed lower than synchronous speed; b) rotor speed higher than synchronous speed



Tenglamalardagi aktiv quvvat isroflarini e'tiborga olmasdan, quyidagilarni olish mumkin: stator va rotor quvvatlarini, mashinaning elektromagnit quvvati hamda tezligini o'zaro bog'laydigan quyidagi ko'rinishda bo'lishi mumkin [3].

$$P_s + P_r \cong P_m ; \quad (6)$$

$$P_r \cong -sP_s . \quad (7)$$

Ushbu formulalarni quyidagi ko'rinishda ham izohlash mumkin:

$$P_s \cong M_{\Sigma} \frac{\omega_s}{p} ; \quad (8)$$

$$P_r \cong -sM_{\Sigma} \frac{\omega_s}{p} . \quad (9)$$

Generator rejimidagi mashinaning foydali ish koeffitsiyenti quyidagi formula bo'yicha hisoblani-shi mumkin [7]:

$$\eta = \frac{P_s + P_r}{P_m} . \quad (10)$$

1-jadvalda 160 kVtli FRAGning xarakteristikalar va parametrlari keltirilgan. Jadvalda rotorning barcha parametrlari stator parametrlariga keltirilgan.

Nominal aktiv quvvat stator va rotor yordamida hosil bo'ladigan umumiy nominal quvvatga ($P_{\Sigma} = P_s + P_r$) bog'liq bo'ladi. Maksimal quvvatni maksimal ishchi sirpanishda olish mumkin (odatda $-0,3 \leq s \leq 0,3$ FRAG diapazonida ishlaydi). Maksimal sirpanishga mo'ljallangan 160 kVt quvvatli FRAG quyidagi quvvatlarni ishlab chiqaradi:

$$P_{\Sigma} = P_s + P_r = P_s(1-s) \quad s = -0,3 \text{ bo'lganda esa: } P_{\Sigma} = 160(1+0,3) = 208 \text{ kVt.}$$

Odatda, ShESdagi faza rotorli asinxron generatorlarning rotor tezligi sinxron tezlikdan juda katta farq qilmaydi (odatda FRAG $-0,3 \leq s \leq 0,3$ diapazonida ishlaydi), shuning uchun rotor kuchlanishi yuqori kuchlanish amplitudalariga yetib bormaydi. Shu bilan talab qilinadigan kuchlanish amplitudasi nuqtai nazaridan chastota o'zgartirgichning quvvatini kamaytiradi va shu bilan tarmoq (stator) kuchlanishi bilan bir xil kuchlanish amplitudalarida ishlaydi [3].

Bundan tashqari, odatda, sirpanish diapazoni $-0,3 \leq s \leq 0,3$ bo'lishi, rotorning nominal quvvat almashinuvi statorning nominal quvvati P_s ning $\pm 30\%$ ini tashkil qilishini anglatadi. Bu esa rotorning nominal toki statorning nominal tokidan kichik bo'lishini bildiradi va shu bilan birga o'zgartirgichning quvvati ham kamayishini ta'minlaydi.

Hisoblashlarda aniqlik kiritish uchun iste'mol qilinayotgan quvvat uchun musbat, ishlab chiqarilayotgan quvvat uchun manfiy ishora qabul qilinadi [12].

1-jadval. FRAG stator parametrlari va rotorining statorga keltirilgan parametrlari

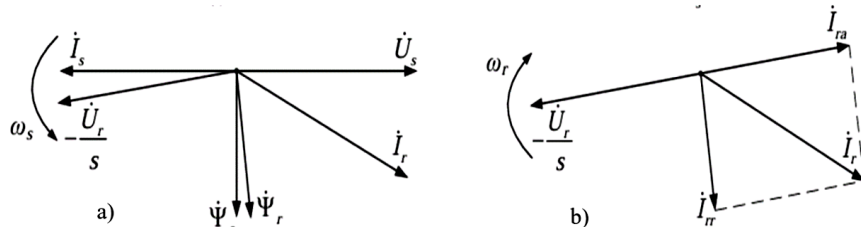
Table 1. Stator parameters of the WRIG and rotor parameters referred to the stator

f_s	50	Stator chulg'amlaridagi kuchlanishning nominal chastotasi, Gs
p	2	Juft qutblar soni
n_n	1500	Sinxron aylanish chastotasi, ayl/min
P_{ns}	160	Nominal quvvat, kVt
U_{sl}	400	Stator chulg'amlarining nominal liniya kuchlanishi, V
I_{snom}	255	Stator chulg'amlarining nominal faza toki, A
M_n	1020	Nominal moment, N·m
k_{msr}	0,34	Generatorning transformatsiyalash koeffitsiyenti
R_s	$13,79 \cdot 10^{-3}$	Stator faza chulg'aming aktiv qarshiligi, Om
$L_{\sigma s}$	$0,152 \cdot 10^{-3}$	Stator faza chulg'aming sochma induktivligi, Gn
L_m	$7,69 \cdot 10^{-3}$	O'zaro induktivlik, Gn
R_r	$7,72 \cdot 10^{-3}$	Rotor faza chulg'aming aktiv qarshiligi, Om
$L_{\sigma r}$	$0,152 \cdot 10^{-3}$	Rotor faza chulg'aming sochma induktivligi, Gn
$L_s = L_{\sigma s} + L_m$	$7,842 \cdot 10^{-3}$	Stator faza chulg'aming to'liq induktivligi, Gn
$L_r = L_{\sigma r} + L_m$	$7,842 \cdot 10^{-3}$	Rotor faza chulg'aming to'liq induktivligi, Gn
J	2,9	Rotor inersii momenti, kg·m ²

3. Natijalar (Results)

2-rasmdagi vektor diagrammalaridan ko'rinib turibdiki, rotor aylanish tezligi sinxron tezlikdan yuqori bo'lgan holatda nafaqat stator chulg'ami, balki rotor chulg'ami ham aktiv quvvat ishlab chiqaradi. Chunki, rotor tokining aktiv tashkil etuvchisi rotor kuchlanishiga nisbatan qarama-qarshi faza (180° ga siljigan), xuddi stator toki va stator kuchlanishi kabi holatda joylashgan bo'ladi. Bu holatda tarmoqqa stator va rotor chulg'amlari tomonidan generatsiya qilingan aktiv quvvatlar

yig'indisi uzatiladi. Rotor chulg'amlaridagi reaktiv quvvat haqida 2-rasmga birinchi qarashda u sig'imiyl xarakterga ega deyish mumkin. Haqiqatan ham, agar vektor diagrammalarda vektorlar soat strelkasiga qarama-qarshi (musbat) yo'nalishda aylanadi, degan odatiy qoidagagina tayanilsa, rotor toki vektori rotor kuchlanishi vektoridan ilgari ketgandek ko'rinishi mumkin. Lekin shuni yodda tutish muhimki, rotor toki va kuchlanishi vektorlarini stator toki va kuchlanishi vektorlari bilan birga tasvirlash faqat bitta burchak tezlik — ω_s (sinxron burchak chastota) uchun to'g'ri hisoblanadi [8]. Bunda mashinaning maydoni ω_s chastota bilan aylanadi va uning yo'nalishi mexanik aylanish yo'nalishiga mos keladi. Ammo bunday holat rotor chulg'amidagi tok va kuchlanish orasidagi haqiqiy fazaviy siljishni to'g'ri aks ettirmaydi. Sababi - bu diagramma vektorlarning vaqt bo'yicha ketma-ketligini ko'rsatmaydi, balki faqat ularning statorga nisbatan fazaviy joylashuvini ifodalaydi [9].

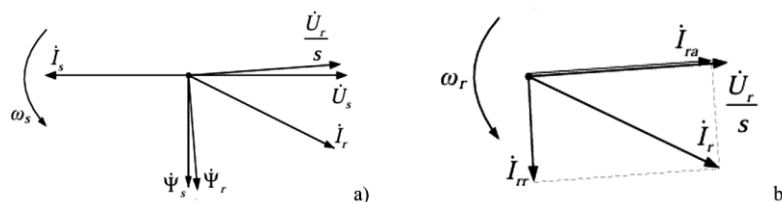


2-rasm. Ikki manbali asinxron generatorning $s = -0,3$ holati uchun vektor diagrammasi: a) stator va rotor chulg'amlarining tok, kuchlanish, magnit oqimi birlashtirilgan fazaviy vektor diagrammasi; b) rotor chulg'amining tok, kuchlanish, magnit oqimi diagrammasi

Fig.2. Vector diagram of the doubly-fed induction generator for the case $s = -0,3$: a) combined phasor diagram of the currents, voltages, and magnetic fluxes of the stator and rotor windings; b) phasor diagram of the current, voltage, and magnetic flux of the rotor winding.

IMAG ishlash prinsipiga ko'ra, rotor sinxron tezlikdan yuqori chastota bilan aylanganda, rotor maydoni rotorga nisbatan valning mexanik aylanish yo'nalishiga qarama-qarshi tomonga aylanishi kerak. Ya'ni u soat strelkasi bo'yicha aylanadi (2, b-rasm), bu esa rotor tokining kuchlanishdan ortda qolishini bildiradi va rotordagi reaktiv quvvatning induktiv xarakterga ega ekanini ko'rsatadi [10].

Sinxron tezlikdan past aylanish rejimi uchun hisoblashning boshlang'ich shartlari rotor sinxron tezlikdan yuqori chastota bilan aylangan holatdagi kabi qabul qilinadi. Faqat sirpanish qiymati o'zgartiradi va quyidagicha qabul qilinadi: $s = 0,3$, ya'ni, bu holat sinxron tezlikdan past aylanish rejimiga to'g'ri keladi.



3-rasm. Ikki manbali asinxron generatorning $s = 0,3$ holati uchun vektor diagrammasi: a) stator va rotor chulg'amlarining tok, kuchlanish, magnit oqimi birlashtirilgan fazaviy vektor diagrammasi; b) rotor chulg'amining tok, kuchlanish, magnit oqimi diagrammasi

Fig.3. Vector diagram of the doubly-fed induction generator for the case $s = 0,3$: a) combined phasor diagram of the currents, voltages, and magnetic fluxes of the stator and rotor windings; b) phasor diagram of the current, voltage, and magnetic flux of the rotor winding

Ushbu vektor diagrammadan turibdiki, rotor aylanish tezligi sinxron tezlikdan past bo'lgan holatda stator chulg'amlarida generatsiya rejimida quvvat olish uchun IMAGning rotor chulg'amlari aktiv quvvatni iste'mol qilishi kerak. Bu holatda rotor tokining aktiv tashkil etuvchisi kuchlanish bilan faza bo'yicha mos tushadi. Shuning uchun ushbu rejimda tarmoq aktiv quvvat bo'yicha $\omega_m > \omega_s$ rejimiga nisbatan kamroq yengillashadi. Generator tarmoqqa beradigan aktiv quvvat qiymati bu holatda stator va rotor quvvatlari ayirmasiga teng bo'ladi:

$$P_{\text{gen}} = P_s - P_r. \quad (11)$$

Bu rejimda rotor magnit maydoni rotorga nisbatan valning mexanik aylanish yo'nalishi bilan bir xil yo'nalishda, ya'ni soat strelkasiga qarshi tomonga aylanadi. Bu esa rotor tokining kuchlanishdan ortda qolishini anglatadi va rotordagi reaktiv quvvatini induktiv xarakterda ekanligini tasdiqlaydi [13]. Shuningdek, sinxron tezlikdan past va yuqori aylanish holatlarida rotor kuchlanishi moduli hamda rotordagi aktiv quvvat qiymatlari taxminan bir xil bo'lishini ta'kidlash lozim:

$$|\dot{U}_r| \approx |s| \cdot |\dot{U}_s|; \quad (12)$$

$$P_r \approx -s P_s. \quad (13)$$

Shuningdek, belgilangan stator chulg'ami tomonidan berilgan aktiv quvvat qiymati asosida, IMAG

uchun turli sirpanish qiymatlari bo'yicha hisoblar olib boriladi:

- sinxron tezlikdan yuqori va past aylanish holatlari uchun: $[s = -0,2; -0,1; 0,1; 0,2]$;
- $s = 0$ holatida ham hisoblash ishlari amalga oshiriladi.

Keyingi bosqichda, shu sirpanish qiymatlari uchun stator chulg'ami tomonidan beriluvchi quvvatning ikkita boshqa qiymatlar bo'yicha hisoblar olib boriladi: $P_s = 0,6 P_{ns}$ va $P_s = 0,3 P_{ns}$. Barcha hisoblash natijalari 2-jadvalda keltirilgan va ular grafik shaklida 4-rasmda taqdim etilgan.

2-jadval. IMAG ning turli rejimlardagi hisoblash natijalari

Table 2. Calculation results of the DFIG under various operating modes

a): $M_{em} = -306,97 \text{ N}\cdot\text{m}$ bo'lgan hol uchun turli sirpanish qiymatlarida stator va rotor chulg'amlari aktiv quvvati, rotor chulg'ami reaktiv quvvati va foydali ish ko'effitsiyenti

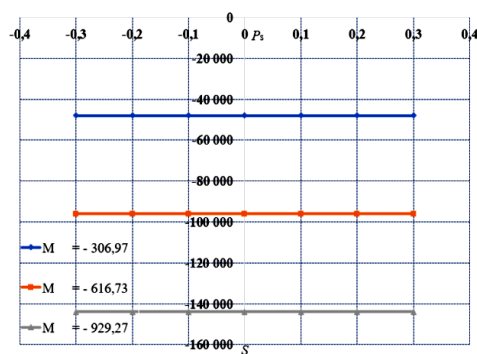
s	$P_s (\text{Vt})$	$P_r (\text{Vt})$	$Q_r (\text{V}\cdot\text{A})$	$P_m (\text{Vt})$	$\eta (\%)$
0,3	-48 000	14 787	19 023	-33 753	98,42
0,2	-48 000	9 965	12 682	-38 575	98,63
0,1	-48 000	5 143	6 341	-43 397	98,82
0	-48 000	321	0	-48 219	98,91
-0,1	-48 000	-4 501	6 341	-53 041	99,03
-0,2	-48 000	-9 323	12 682	-57 863	99,14
-0,3	-48 000	-14 144	19 023	-62 684	99,16

b): $M_{em} = -616,73 \text{ N}\cdot\text{m}$ bo'lgan hol uchun turli sirpanish qiymatlarida stator va rotor chulg'amlari aktiv quvvati, rotor chulg'ami reaktiv quvvati va foydali ish ko'effitsiyenti.

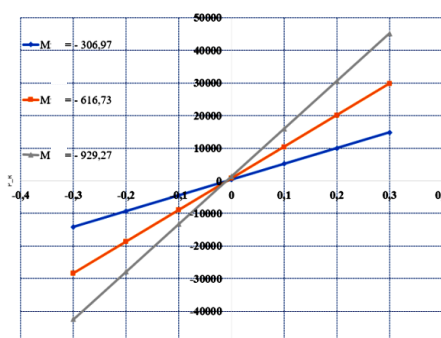
s	$P_s (\text{Vt})$	$P_r (\text{Vt})$	$Q_r (\text{V}\cdot\text{A})$	$P_m (\text{Vt})$	$\eta (\%)$
0,3	-96 000	29 768	20 597	-67 813	97,16
0,2	-96 000	20 080	13 731	-77 500	98,12
0,1	-96 000	10 393	6 866	-87 188	98,28
0	-96 000	705	0	-96 875	98,41
-0,1	-96 000	-89 82	6 866	-106 563	98,54
-0,2	-96 000	-18 670	13 731	-116 251	98,62
-0,3	-96 000	-28 357	20 597	-125 938	98,74

c): $M_{em} = -929,27 \text{ N}\cdot\text{m}$ bo'lgan hol uchun turli sirpanish qiymatlarida stator va rotor chulg'amlari aktiv quvvati, rotor chulg'ami reaktiv quvvati va foydali ish ko'effitsiyenti.

s	$P_s (\text{Vt})$	$P_r (\text{Vt})$	$Q_r (\text{V}\cdot\text{A})$	$P_m (\text{Vt})$	$\eta (\%)$
0,3	-144 000	45 135	23 107	-102 179	96,84
0,2	-144 000	30 538	15 405	-116 776	97,25
0,1	-144 000	15 941	7 702	-131 373	97,58
0	-144 000	1 344	0	-145 970	97,76
-0,1	-144 000	-13 253	7 702	-160 567	98,02
-0,2	-144 000	-27 850	15 405	-175 164	98,16
-0,3	-144 000	-42 447	23 107	-189 761	98,32



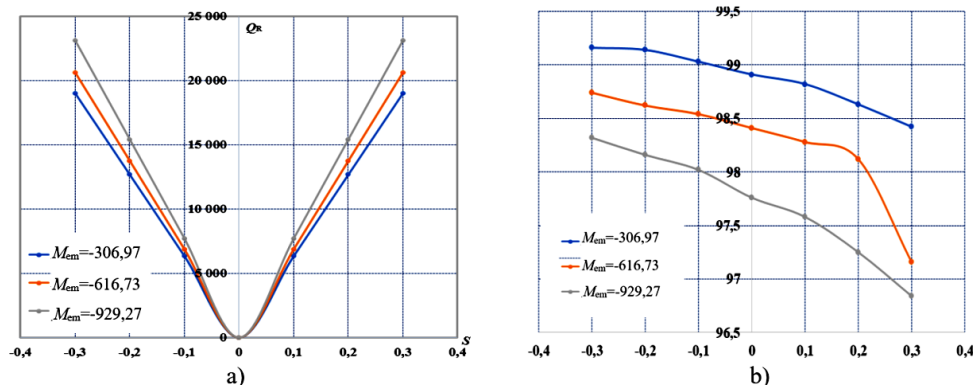
a)



b)

4-rasm. M_{em} ning turli qiymatlarida stator va rotor aktiv quvvatlarining sirpanishga bog'liqligi: a) stator aktiv quvvati P_s , b) rotor aktiv quvvati P_r

Fig.4. Dependence of stator and rotor active powers on slip at different values of M_{em} : a) stator active power P_s ; b) rotor active power P_r



5-rasm. M_{em} ning turli qiymatlarida rotor reaktiv quvvati va generator foydali ish ko'effitsiyentini sirpanishga bog'liqligi: a) rotor reaktiv quvvati Q_r (V·A), b) generator foydali ish ko'effitsiyenti η (%)

Fig.5. Dependence of the rotor reactive power and generator efficiency on slip at different values of M_{em} : a) rotor reactive power Q_r (V·A); b) generator efficiency η (%).

4. Munozara (Discussion)

Qurilgan vektor diagrammalaridan ko'rinib turibdiki, rotor aylanish tezligi sinxron tezlikdan yuqori bo'lgan holatda nafaqat stator chulg'ami, balki rotor chulg'ami ham aktiv quvvat ishlab chiqaradi. Chunki, rotor tokining aktiv tashkil etuvchisi rotor kuchlanishiga nisbatan qarama-qarshi faza, xuddi stator toki va stator kuchlanishi kabi holatda joylashgan bo'ladi. Bu holatda tarmoqqa stator va rotor chulg'amlari tomonidan generatsiya qilingan aktiv quvvatlar yig'indisi uzatiladi. Generator rotor aylanish tezligi sinxron tezlikdan 30 % kichik bo'lgan holatda ham, rotor chulg'ami ham qo'shimcha quvvat berish orqali quvvat ishlab chiqarishini ko'rish mumkin. Fazali rotorli asinxron mashina keng boshqaruv imkoniyatlariga ega ekanligi energiya ta'minoti va boshqaruv jarayoni stator hamda rotor tomonidan amalga oshirilishi mumkin. Stator chulg'amiga kondensator bateriyalarini ulash orqali IMAG ni kerakli reaktiv quvvat bilan ta'minlash imkonini beradi.

5. Xulosa (Conclusion)

ShES tarkibidagi ikki manbali asinxron generator statik rejimidagi elektromexanik jarayonlar analitik tasviri keltirildi. asosidagi haqida ma'lumot berilgan. Ushbu generator tarmoq bilan parallel rejimda, val aylanish tezligi o'zgaruvchan holatda ishlaydi. Statik rejim uchun IMAGning matematik modeli, belgilangan rotor aylanish chastotasi va moment qiymatlari hamda mashina parametrlari asosida stator va rotor kuchlanishlari, toklari va magnit oqimlari, stator va rotor quvvatlarining aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarini hisoblash imkonini berdi. Bu ma'lumotlar IMAG uchun dastlabki bosqichda chastota o'zgartirgich loyihalashda qo'llanilishi mumkin.

Faza rotorli asinxron mashina keng boshqaruv imkoniyatlariga ega bo'lib, energiya ta'minoti va boshqaruv jarayoni stator hamda rotor tomonidan amalga oshirilishi mumkin. O'zgaruvchan aylanish tezligiga ega elektr generatsiya qurilmalarida IMAG qo'llanilishi istiqbolli ekanligi, chunki rotor zanjirida qo'yiladigan chastota o'zgartirgich qurilmasi quvvati mashina quvvatiga nisbatan kichik bo'lishi asoslab berildi. Stator zanjirida kondensatorlar ishlatilishi IMAGni reaktiv quvvat bilan ta'minlaydi, bu esa mashinaning nominal ish holatini ta'minlash imkonini beradi. Rotor tok va kuchlanish o'rtasidagi burchakni o'zgartirish imkoni bilan skalyar boshqaruv tizimi stator zanjiridagi kuchlanish, valdagi moment va reaktiv quvvat iste'molini boshqarish imkonini beradi. Tizim maksimal samaradorlikka sinxron tezlikdan yuqori chastotada erishadi, sinxron tezlikdan past chastotada rotor zanjiriga past chastotali sinusoidal tok berish orqali qo'shimcha quvvat ishlab chiqarishga erishiladi.

ADABIYOT

1. Beltran, B.; Ahmed-Ali T.; Benbouzid M.E.H. Mode Power Control of Variable Speed Wind Energy Conversion Systems // IEEE Trans. Energy Convers. 2015, 23, 551–558.
2. Wu F., Zhang X.P., Ju P. Modeling and control of the wind turbine with the direct drive permanent magnet generator integrated to power grid // Proceedings of the 3rd International Conference on Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT '08), China, April 2008. p. 57-60.
3. Hu J., He Y., Xu L., Williams B. Improved control of DFIG systems during network unbalance using PIR current regulators // IEEE Trans. Ind. Electron., Feb. 2009. vol. 56, no. 2, pp. 439–451.
4. Ontiveros L.J., Mercado P.E. and Suvire G.O. A New Model of the Double-Feed Induction Generator Wind Turbine // 2010 IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, Latin America, 2010. p. 263-269.

5. Нгуен Хыу Нам, А.В.Бериллов, В.Г.Еременко, г.с.Мыцык, Мье Мин Тант. Исследование системы генерирования на базе асинхронного генератора двойного питания в режиме параллельной работы с сетью // Практическая силовая электроника, 2018. №2(70).
6. Taniev M., Mirkhonov U., Rakhmatova M., Isakov F. Study of The Substitution Scheme of the Parameters of a Phase-Rotor Induction Generator // AIP Conference Proceedings 2552, 060010, 2023.
7. Toirov O., Taniev M., Sotiboldiev A. Questions of Control of Asynchronous Generators Used at HPP and WPP Stations // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. Vol. 9, Issue 4, April 2022.
8. Toirov O.Z., Taniyev M.X. Shamol elektr stansiyalarida asinxron generatorlarni qo'llash imkoniyatlari // Energiya va resurs tejash muammolari. Maxsus son. 2022. (№83). B. 283-287.
9. Алимходжаев Ш.К. Ветроэлектростанции, работающие параллельно с действующей энергосистемой Узбекистана // Проблемы энерго-и ресурсосбережения. 2015. №1. С.180.
10. Ke Ma. Power Electronics for the Next Generation Wind Turbine System. Springer, 2015. 198 p.
11. Hatata A.Y., Mousa M.G., Elmahdy R.M. Analysis of wind data and assessing wind energy potentiality for selected locations in Egypt // International Journal of Scientific Engineering Research. Volume 6. Issue 3. 2015. P. 604-609.
12. Nazir M.S.; Wu Q.; Li M.; Zhang L. Symmetrical Short Circuit Parameter Differences of Double Fed Induction Generator and Synchronous Generator Based Wind Turbine. Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci. (IJECS) 2017, 6, 268–277.

REFERENCES

1. Beltran, B.; Ahmed-Ali T.; Benbouzid M.E.H. Mode Power Control of Variable Speed Wind Energy Conversion Systems // IEEE Trans. Energy Convers. 2015, 23, 551–558.
2. Wu F., Zhang X.P., Ju P. Modeling and control of the wind turbine with the direct drive permanent magnet generator integrated to power grid // Proceedings of the 3rd International Conference on Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT '08), China, April 2008. p. 57-60.
3. Hu J., He Y., Xu L., Williams B. Improved control of DFIG systems during network unbalance using PIR current regulators // IEEE Trans. Ind. Electron., Feb. 2009. vol. 56, no. 2, pp. 439–451.
4. Ontiveros L.J., Mercado P.E. and Suvire G.O. A New Model of the Double-Feed Induction Generator Wind Turbine // 2010 IEEE Transmission and Distribution Conference and Ex-position, Latin America, 2010. p. 263-269.
5. Nguyen Huu Nam, Berilov A.V., Eremenko V.G., Mytsyk G.S., Mye Min Tant. Investigation of a Power Generation System Based on a Doubly-Fed Induction Generator Operating in Parallel with the Grid // Practical Power Electronics, 2018. No. 2 (70).
6. Taniev M., Mirkhonov U., Rakhmatova M., Isakov F. Study of The Substitution Scheme of The Parameters of A Phase-Rotor Induction Generator // AIP Conference Proceedings 2552, 060010, 2023.
7. Toirov O., Taniev M., Sotiboldiev A. Questions of Control of Asynchronous Generators Used at HPP and WPP Stations // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. Vol. 9, Issue 4, April 2022.
8. Toirov O.Z., Taniev M.Kh. Possibilities of Using Induction Generators in Wind Power Plants // Problems of Energy and Resource Saving. Special Issue. 2022. No. 83. pp. 283–287.
9. Alimkhodjaev Sh.K. Wind Power Plants Operating in Parallel with the Existing Power System of Uzbekistan // Problems of Energy and Resource Saving, 2015. No. 1. p. 180.
10. Ke Ma. Power Electronics for the Next Generation Wind Turbine System. Springer, 2015. 198 p.
11. Hatata A.Y., Mousa M.G., Elmahdy R.M. Analysis of wind data and assessing wind energy potentiality for selected locations in Egypt // International Journal of Scientific Engineering Research. Volume 6. Issue 3. 2015. P. 604-609.
12. Nazir M.S.; Wu Q.; Li M.; Zhang L. Symmetrical Short Circuit Parameter Differences of Double Fed Induction Generator and Synchronous Generator Based Wind Turbine. Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci. (IJECS) 2017, 6, 268–277.