



**KIMYO INTERNATIONAL UNIVERSITY IN
CENTRAL ASIAN JOURNAL OF STEM**

ISSN 2181-2934 <http://stem.kiut.uz/>



<https://doi.org/10.5281/zenodo.21131842>

**DFIG TIZIMINING VIRTUAL QARSHILIK ASOSIDAGI O'TKINCHI
SINXRONLASHUV BARQARORLIGI**

1nd Olimjon Toirov, Toshkent davlat texnika universiteti

Toshkent, O'zbekiston, olimjon.t@mail.ru

2nd Mirzoxid Taniyev, Toshkent davlat texnika universiteti

Toshkent, O'zbekiston, tanievmirzohid@gmail.com

3st Tuymurod Sadullaev, Toshkent Kimyo xalqaro universiteti

Toshkent, O'zbekiston, t.sadullayev@kiut.uz

4th Shakhlo Xodjayeva, Toshkent davlat texnika universiteti

Toshkent, shahlo9929@gmail.com

Annotatsiya

Shamol energetikasining jadal rivojlanishi hamda elektr tarmoqlarida shamol elektr stansiyalarining ulushi ortib borishi natijasida ikki manbali asinxron generator (DFIG) asosidagi shamol turbinalarining tarmoq avariylari vaqtidagi o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligini ta'minlash muhim ilmiy-amaliy muammolardan biriga aylanmoqda. An'anaviy avariya keyingi ish rejimini ta'minlash usullari, xususan, Crowbar himoya tizimi elektr energetik tizimining xavfsizligini ta'minlashda keng qo'llanilsa-da, mazkur usul generatorning faol boshqaruv imkoniyatlarini cheklaydi hamda tarmoq kuchlanishining sifatiga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Shu nuqtai nazardan, virtual qarshilikka asoslangan demagnitlash boshqaruvi oddiy tuzilishi, amalga oshirish qulayligi va magnit oqimini samarali so'ndirish xususiyatlari tufayli istiqbolli yechim sifatida qaralmoqda. Biroq mavjud ilmiy tadqiqotlarda ushbu boshqaruv usulining DFIG tizimlarining o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligiga ta'siri yetarli darajada chuqur tahlil qilinmagan.

Kalit so'zlar

Ikki manbali asinxron generator (DFIG); virtual qarshilik; demagnitlash boshqaruvi; o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligi; fazaga qulflangan kontur (PLL).

I. KIRISH

Jahon energetika tizimida ekologik toza va kam uglerodli texnologiyalarga o'tish jarayoni jadallashib borayotgan sharoitda shamol energetikasi qayta tiklanuvchi energiya manbalari ichida eng istiqbolli va tez rivojlanayotgan sohalaridan biri sifatida namoyon bo'lmoqda [1], [2]. Xususan, moslashuvchan boshqaruv imkoniyatlari, yuqori energetik samaradorligi hamda nisbatan past kapital xarajatlari bilan ajralib turadigan ikki manbali asinxron generator (Doubly-Fed Induction Generator, DFIG) asosidagi shamol turbinalari zamonaviy tarmoqqa ulanuvchi shamol elektr stansiyalarining asosiy konfiguratsiyalaridan biri sifatida keng qo'llanilmoqda [3].

Shu bilan birga, qayta tiklanuvchi energiya manbalari ulushining ortishi elektr energetika tizimlarining statik va dinamik barqarorligiga nisbatan yangi texnik talablarni shakllantirmoqda. Ayniqsa, tarmoqda yuzaga keladigan kuchli buzilishlar va avariya holatlari sharoitida DFIG asosidagi shamol turbinalarining dinamik javob xususiyatlari hamda ularning o'tkinchi rejimlarda sinxron ishlash qobiliyati alohida ahamiyat kasb etmoqda [4], [5].

Avariya holatlarida DFIG tizimlarida fazaga qulflangan halqa (Phase-Locked Loop, PLL)ning chiqish burchak tezligi hamda fazaviy sinxronlashuv parametrlari barqarorligini yo'qotishi mumkin. Bu holat tarmoq bilan sinxronlashuvning buzilishiga va natijada generatorning elektr tarmog'idan ajralib ketishi ehtimolining ortishiga olib keladi [6].

Shu munosabat bilan, qayta tiklanuvchi energiya manbalari ulushi yuqori bo'lgan elektr energetika tizimlarida DFIG asosidagi shamol turbinalarining o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligini (Transient Synchronization Stability, TSS) tahlil qilish hamda uni oshirishga qaratilgan samarali boshqaruv usullarini ishlab chiqish dolzarb ilmiy-amaliy vazifalardan biri hisoblanadi.

DFIG asosidagi shamol turbinalarining o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligiga bag'ishlangan dastlabki tadqiqotlar asosan tarmoq avariylari sharoitida barqaror muvozanat nuqtalarining (steady-state equilibrium point, SEP) mavjudligi va ularning yuzaga kelish shartlarini aniqlashga qaratilgan. Xususan, [7], [8] ishlarida terminal kuchlanishi, tarmoq kuchlanishi hamda tarmoq impedansidagi kuchlanish tushuvi o'rtasidagi vektor uchburchak munosabatlari kompleks tahlil qilinib, qayta tiklanuvchi energiya manbalari integratsiya qilingan energetik tizimlarda o'tkinchi barqarorlikni ta'minlashda SEP mavjudligi hal qiluvchi omillardan biri ekanligi asoslab berilgan.

PLLning noliney dinamik xususiyatlari tufayli tizimning dastlabki ish nuqtasidan barqaror muvozanat nuqtasiga (SEP) o'tish jarayonidagi barqarorlik faqatgina muvozanat nuqtasining mavjudligi bilan cheklanmaydi. Mazkur o'tish jarayonining muvaffaqiyatli kechishi boshlang'ich shartlar, tizimning joriy ish rejimi hamda PLLning dinamik javob xususiyatlariga ham sezilarli darajada bog'liq bo'ladi. [9] ishda ushbu omillarning DFIG tizimlari barqarorligiga ta'siri alohida ta'kidlangan.

Shu sababli, DFIG asosidagi shamol energetik qurilmalarining o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligini baholashda PLL dinamikasini hisobga olgan holda kompleks va keng qamrovli tahlil yondashuvlarini qo'llash zarurati yuzaga keladi.

II. MAVZUGA OID ADABIYOTLAR SHARHI

A. Tadqiqot yo'nalishlari

Mazkur maqolada virtual qarshilik boshqaruvi sharoitida DFIG tizimlarining o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligi kompleks ravishda tahlil qilindi hamda virtual qarshilikka asoslangan demagnitlash boshqaruvi bilan PLL dinamikasi o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni ifodalovchi yangi to'rtinchi tartibli o'tkinchi sinxronlashuv modeli taklif etildi.

Taklif etilgan model virtual qarshilik ta'siri natijasida yuzaga keluvchi o'tkinchi quvvat komponentlari hamda musbat dempfirlash hadlarini aniq analitik ko'rinishda ifodalash imkonini beradi. Tadqiqot natijalari ushbu hadlar DFIG tizimlarining sinxronlashuv barqarorligini ta'minlashda hal qiluvchi ahamiyatga ega ekanligini ko'rsatdi.

Olingan nazariy va amaliy natijalar avariya holatlarida shamol energetik qurilmalarining barqaror ishlashini ta'minlash, shuningdek, qayta tiklanuvchi energiya manbalari ulushi yuqori bo'lgan elektr energetika tizimlarining ishonchliligi va dinamik barqarorligini oshirish uchun ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

Heng Wu va Xiongfei Wang. Ushbu ishda PLL-sinxronlashtirilgan VSC tizimlarining o'tkinchi barqarorligi fazaviy tekislik usuli orqali tahlil qilingan. Birinchi va ikkinchi tartibli PLL dinamikasi taqqoslangan. Dinamik jarayonni tahlil qilishda tadqiqotchilar asosan PLL dinamikasi ustun bo'lgan ikkinchi tartibli o'tkinchi sinxronlashuv modelidan foydalanishgan. Bu yondashuvda tizim xulq-atvori fazaviy dinamika nuqtai nazaridan o'rganilib, tahlilni chuqurlashtirish maqsadida faza tekisligi usuli, Lyapunovning to'g'ridan-to'g'ri usuli hamda sezgirlik tahlili kabi matematik yondashuvlar qo'shimcha instrument sifatida qo'llanilgan.

Xiongfei Wang, Frede Blaabjerg. PLL ning ikkinchi tartibli modeli bilan sinxron generatorlarning klassik tebranish tenglamasi o'rtasidagi strukturaviy o'xshashlik, o'tkinchi barqarorlikni tahlil qilishda teng maydon mezoni hamda energiya funksiyasi usullarini samarali qo'llash imkonini bergan. Bu analogiya orqali PLL dinamikasi energetik nuqtai nazardan baholanib, barqarorlik chegaralarini aniqlash osonlashgan. PLL dinamikasi sinxron generatorning klassik swing equation modeli bilan taqqoslanib, Equal Area Criterion (EAC) ni grid-following converter tizimlariga tatbiq qilish ko'rsatilgan. Energiya funksiyasi asosida transient stability chegaralari baholangan.

Yicheng Liao. PLL tufayli yuzaga keluvchi negative damping transient stability ga qanday ta'sir qilishi tahlil qilingan va modified EAC orqali critical clearing angle aniqlangan. Zaif elektr tarmoqlarida PLL ning manfiy dempirlash xususiyati converter oscillation larini kuchaytirishi ko'rsatilgan. Bu ish keyingi improved-EAC yondashuvlariga nazariy asos bo'lgan.

S. Muller va boshqalar. Tarmoq kuchlanishidagi buzilishlar paytida DFIG stator oqimlari va rotor zanjiridagi ortiqcha toklar tahlil qilingan. O'tkinchi magnit oqimlari dinamikasi ko'rib chiqilgan. DFIG konstruksiyasi, statorning tarmoqqa to'g'ridan-to'g'ri ulanishi va fault holatlarida rotorda katta o'tkinchi toklar hosil bo'lishi nazariy jihatdan tushuntirilgan.

Anca D. va boshqalar. Tarmoqdagi qisqa tutashuvlar paytida stator kuchlanishining pasayishi rotorda induced overvoltage va overcurrent hosil qilishi eksperimental va matematik modellar orqali ko'rsatilgan.

Lie Xu. Crowbar himoyasi fault holatlarida RSC ni ortiqcha tokdan himoya qilishi, ammo Crowbar faollashganda DFIG oddiy asinxron generator kabi ishlab, tarmoqdan katta reaktiv quvvat iste'mol qilishi ko'rsatilgan. Crowbar faollashishi natijasida reactive power support pasayishi va voltage stability yomonlashishi tahlil qilingan.

Jin Yang. Rotor toklarini real vaqtda kompensatsiya qilish orqali Crowbarsiz avariya rejimida barqaror ishlash ta'minlangan.

B. Olib borilgan tadqiqotlarning kamchiliklari

Biroq, manbalarda asosiy e'tibor rotor tokini boshqarish dinamikasi va magnit Biroq mavjud tadqiqotlarda asosiy e'tibor rotor tokini boshqarish dinamikasi hamda magnit oqimini so'ndirish samaradorligini tahlil qilishga qaratilgan bo'lib, PLLning o'tkinchi dinamik ta'siri yetarli darajada hisobga olinmagan. Natijada, ushbu modellar DFIG tizimlarining o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligini kompleks va to'liq baholash imkonini bermaydi.

Boshqa tomondan, sinxronlashuv barqarorligini tahlil qilishda keng qo'llaniladigan klassik ikkinchi tartibli PLL modellarida [10–15] tok konturining dinamikasi soddalashtirilgan holda e'tiborsiz qoldiriladi. Bu esa virtual qarshilikka asoslangan demagnitlash boshqaruvining tizimning o'tkinchi sinxronlashuv xulq-atvoriga ko'rsatadigan ta'sirini to'liq va aniq aks ettirishni cheklaydi.

Ayrim tadqiqotlarda tarmoq avariylari sharoitida qo'llaniladigan demagnitlash boshqaruvi muayyan holatlarda o'tkinchi beqarorlikka olib kelishi mumkinligi ko'rsatilgan hamda DFIG asosidagi shamol turbinalarida mazkur beqarorlikning yuzaga kelish mexanizmi tahlil qilingan. Biroq ushbu tadqiqotlarda ko'rib chiqilgan demagnitlash strategiyasi virtual qarshilikka asoslangan yondashuvdan farqli ravishda, o'tkinchi stator magnit oqimi asosida rotor tokining etalon qiymatini shakllantirish tamoyiliga asoslanadi. Shu sababli, virtual qarshilikka asoslangan boshqaruv bilan PLL dinamikasi o'rtasidagi o'zaro ta'sir mexanizmi o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligi nuqtai nazaridan hozirgi vaqtga qadar yetarlicha nazariy jihatdan modellashtirilmagan hamda kompleks tarzda tahlil qilinmagan.

Mazkur ilmiy bo'shliqni to'ldirish maqsadida ushbu maqolada virtual qarshilikka asoslangan demagnitlash boshqaruvi tizimda sekin o'zgaruvchi tok dinamikasini shakllantirishi va ushbu dinamikaning PLL sinxronlashuv mexanizmi bilan o'zaro bog'lanishga kirishishi natijasida o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatishi nazariy jihatdan asoslab berildi. Ushbu o'zaro bog'lanish mexanizmlarini chuqur tahlil qilish maqsadida PLL dinamikasi hamda tok konturi dinamikasini bir vaqtning o'zida hisobga oluvchi to'rtinchi tartibli o'tkinchi sinxronlashuv modeli ishlab chiqildi. Taklif etilgan model virtual qarshilik ta'sirida hosil bo'ladigan o'tkinchi quvvat hadlari hamda musbat dempfirlash (so'ndirish) komponentlarini aniq va izchil ravishda ifodalash imkonini beradi.

Bundan tashqari, virtual qarshilik parametrlari hamda tok konturining proporsional-integral (PI) koeffitsiyentlarining o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligiga ta'siri kompleks ravishda tahlil qilindi. Olingan natijalar DFIG asosidagi shamol turbinalari uchun boshqaruv parametrlarini optimallashtirishda nazariy asos hamda amaliy tavsiyalar ishlab chiqish uchun muhim ilmiy poydevor bo'lib xizmat qiladi.

III. TADQIQOT METODOLOGIYASI

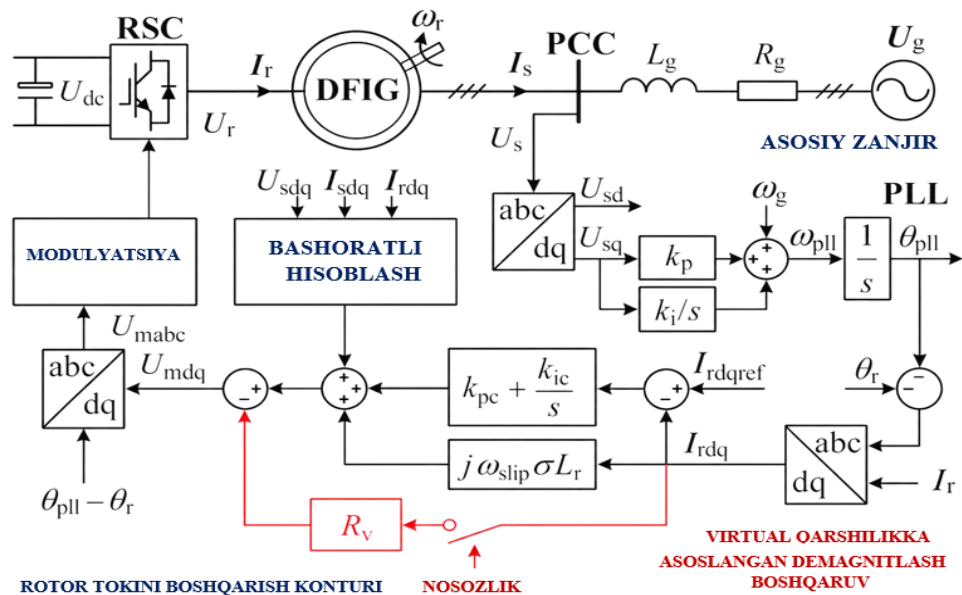
1-rasmda tarmoqqa ulangan DFIG asosidagi shamol energetika tizimining funksional topologiyasi keltirilgan. Ushbu tizimda DFIGning stator chulg'ami elektr tarmog'iga to'g'ridan-to'g'ri ulangan bo'lib, rotor chulg'ami esa o'zgarmas tok shinasini orqali rotor tomonli quvvat o'zgartirgichi (Rotor Side Converter, RSC)ga bog'langan. Tizimdagi o'zgarmas tok bog'lamasi kuchlanishi U_{dc} bilan ifodalanadi. Generatorning stator va rotor toklari mos ravishda I_s va I_r belgilari orqali tavsiflanadi.

Mazkur tuzilma generatorning faol va reaktiv quvvatini mustaqil ravishda boshqarish imkonini berib, shamol tezligining o'zgaruvchan sharoitlarida ham energetik tizimning barqaror va samarali ishlashini ta'minlaydi. Shu bilan birga, rotor tomonli quvvat o'zgartirgichi orqali generatorning elektromagnit jarayonlarini tezkor boshqarish imkoniyati mavjud bo'lib, bu avariya holatlarida tizimning dinamik barqarorligini oshirishda muhim ahamiyat kasb etadi.

Ulanish nuqtasidagi kuchlanish (Point of Common Coupling, PCC) DFIG stator chiqish terminali kuchlanishi sifatida qabul qilinib, U_s orqali ifodalanadi. Elektr tarmog'i Tevenen ekvivalent sxemasi asosida modellashtirilgan bo'lib, mazkur modelda U_g tarmoqning ekvivalent kuchlanish manbaini, R_g ekvivalent aktiv qarshilikni, L_g esa ekvivalent induktivlikni ifodalaydi. Ushbu model tarmoq va generator o'rtasidagi elektromagnit o'zaro ta'sir jarayonlarini tahlil qilish hamda tizimning dinamik xususiyatlarini aniq baholash imkonini beradi.

DFIG tizimi tarkibidagi tarmoq tomonli quvvat o'zgartirgichi (Grid Side Converter, GSC) asosan o'zgarmas tok bog'lamasi kuchlanishini barqaror holatda ushlab turish vazifasini bajaradi. Biroq uning quvvat reytingi nisbatan kichik bo'lganligi sababli, rotor tomonli quvvat o'zgartirgichi hamda generatorning elektromexanik dinamikasiga ta'siri cheklangan hisoblanadi. Shuningdek, GSCning sinxronlashuv barqarorligi jarayonlariga ta'siri ham sezilarli darajada emas.

Shu sababli, mazkur tadqiqotda tahlilni soddalashtirish va asosiy dinamik jarayonlarga e'tibor qaratish maqsadida GSC modeli ko'rib chiqilmagan [23]. Bunda asosiy e'tibor virtual qarshilikka asoslangan demagnitlash boshqaruvi hamda PLL dinamikasi o'rtasidagi o'zaro ta'sir mexanizmlarini tahlil qilishga qaratildi.



1-rasm. Tarmoqqa ulangan DFIG asosidagi shamol turbinasining topologiyasi

Elektr tarmog'ida avariya yoki buzilish holatlari yuzaga kelganda, DFIG asosidagi shamol energetika qurilmasi tizim barqarorligini saqlash hamda uskunalarni himoya qilish maqsadida demagnitlash boshqaruv rejimiga o'tkaziladi. Ushbu rejimning asosiy vazifasi o'tkinchi jarayonlar davomida hosil bo'ladigan ortiqcha energiyani samarali ravishda so'ndirish, rotor zanjirida yuqori amplitudali kuchlanish va toklarning yuzaga kelishini cheklash, shuningdek, quvvat elektron qurilmalari hamda generator elementlarining ishonchli va xavfsiz ishlashini ta'minlashdan iborat.

Bunday boshqaruv yondashuvi avariya rejimlarda tizimning dinamik barqarorligini oshirish, elektromagnit o'tkinchi jarayonlarni yumshatish hamda DFIG qurilmasining elektr va mexanik yuklanishlarga nisbatan chidamliligini ta'minlashda muhim ahamiyat kasb etadi. Shu bilan birga, demagnitlash boshqaruvi tarmoq bilan sinxron ishlash qobiliyatini saqlab qolish orqali shamol energetika qurilmasining avariya keyingi tiklanish jarayonini barqarorlashtirishga xizmat qiladi.

An'anaviy demagnitlash strategiyalarida tokning vektorli boshqaruv tizimi tarkibiga virtual qarshilik kiritish usuli keng qo'llaniladi. Bunda rotor toki I_{rdq} virtual qarshilik R_v ta'sirida hosil bo'ladigan qo'shimcha kuchlanish tushuvi komponenti orqali shakllantirilib, mazkur signal modulyasiya kuchlanishi U_{mdq} ga qayta aloqa zanjiri orqali uzatiladi. Ushbu yondashuv avariya rejimlarda rotor tokining keskin ortib ketishini cheklash hamda o'tkinchi energiyani samarali so'ndirish imkonini beradi.

Biroq virtual qarshilikka asoslangan demagnitlash boshqaruvi rotor tok konturining dempirlash xususiyatlariga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Natijada tok konturining dinamik parametrlari o'zgaradi va tizimning o'tkinchi jarayonlarga bo'lgan dinamik javobi qayta shakllanadi. Bu esa ayrim holatlarda boshqaruv tizimining tezkorligi pasayishi, tok tebranishlarining ortishi yoki umumiy barqarorlik xususiyatlarining yomonlashuviga olib kelishi mumkin.

Hosil bo'lgan tok dinamikasi tarmoq impedansi bo'ylab dinamik kuchlanish tushuvlarini yuzaga keltiradi. Mazkur holat o'z navbatida PCC nuqtasidagi kuchlanishning amplitudasi va shakli o'zgarishiga sabab bo'ladi hamda PLL tizimining o'tkinchi sinxronlashuv dinamikasiga bevosita ta'sir ko'rsatadi.

Shu sababli, tarmoq avariylari sharoitida virtual qarshilikka asoslangan boshqaruv strategiyalarining DFIG asosidagi shamol turbinolari sinxronlashuv barqarorligiga ta'sirini baholash chuqur nazariy tahlil va kompleks amaliy tadqiqotlarni talab etadi.

O'tkinchi sinxronlashuv modellari, odatda, PLL asosida shakllantirilgan to'g'ri-kvadratur $d-q$ koordinatalar tizimida quriladi. Ushbu koordinatalar tizimi PLL tomonidan aniqlanuvchi burchak tezligi ω_{pll} va fazaviy burchak θ_{pll} ga bog'liq holda aylanuvchi sinxron koordinatalar ramkasi sifatida ifodalanadi.

d - q koordinatalar tizimidan foydalanish DFIG tizimidagi elektromagnit jarayonlarni soddalashtirilgan shaklda tahlil qilish, o'zgaruvchan tok kattaliklarini doimiy qiymatlar ko'rinishida ifodalash hamda boshqaruv algoritmlarini samarali amalga oshirish imkonini beradi.

Mazkur d - q koordinatalar tizimida DFIGning kuchlanish va magnit oqimi dinamikasi quyidagi tenglamalar orqali tavsiflanadi:

$$\begin{cases} u_{sdq} = -R_s I_{sdq} + j\omega_{p11} \psi_{sdq} + \frac{d}{dt} \psi_{sdq} \\ u_{rdq} = -R_r I_{rdq} + j\omega_{sirp} \psi_{rdq} + \frac{d}{dt} \psi_{rdq} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_{sdq} = -L_s I_{sdq} + L_m I_{rdq} \\ \psi_{rdq} = -L_r I_{rdq} - L_m I_{sdq} \end{cases} \quad (2)$$

Bu yerda dq koordinatalar tizimidagi o'zgaruvchilar quyidagicha belgilangan: stator kuchlanishi U_{sdq} , stator toki I_{sdq} , stator magnit oqimi ψ_{sdq} , rotor kuchlanishi U_{rdq} , rotor toki I_{rdq} va rotor magnit oqimi ψ_{rdq} . L_s , L_r va L_m mos ravishda stator induktivligi, rotor induktivligi va magnitlash induktivligini ifodalaydi. R_s va R_r esa stator hamda rotor qarshiliklarini bildiradi.

Sirpanish burchak tezligi quyidagicha aniqlanadi: $\omega_{sirp} = \omega_{pll} - \omega_r$. Bu yerda ω_{pll} - PLL burchak tezligi, ω_r esa rotorning mexanik burchak tezligidir.

(1) va (2) tenglamalarni birlashtirish natijasida quyidagi ifoda hosil bo'ladi.

$$u_{rdq} = (R_r + \sigma L_r \frac{d}{dt}) I_{rdq} + j\omega_{sirp} \sigma L_r I_{rdq} + \frac{L_m}{L_s} (u_{sdq} + R_s I_{sdq} - j\omega_r \psi_{sdq}) \quad (3)$$

Bu yerda oqish koeffitsiyenti quyidagicha aniqlanadi: $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$

(3) tenglama asosida rotor tomonli quvvat o'zgartirgichining rotor tok konturi boshqaruvi 1-rasmda ko'rsatilgan tuzilma asosida shakllantiriladi. Mazkur boshqaruv tizimida rotor tokining etalon qiymatini nol statik xatolik bilan kuzatishni ta'minlash maqsadida proporsional-integral (PI) boshqaruvchisi qo'llaniladi.

Shu bilan birga, (3) tenglamada mavjud bo'lgan oxirgi ikki had ta'sirini kompensatsiya qilish maqsadida ajratish hamda oldindan ta'sir etuvchi komponentlar kiritiladi. Bu esa d va q -o'qlari bo'yicha tok kanallari o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni kamaytirish, shuningdek, tok konturining dinamik tezkorligi va barqarorlik xususiyatlarini yaxshilash imkonini beradi.

1-rasmda keltirilgan tok boshqaruv tuzilmasiga muvofiq, tarmoq avariylari sharoitida RSCning modulyasiya kuchlanishi quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$u_{mdq} = (k_{pc} + \frac{k_{is}}{s})(I_{rdqref} - I_{rdq}) + j\omega_{sirp} \sigma L_r I_{rdq} + \frac{L_m}{L_s} (u_{sdq} + R_s I_{sdq} - j\omega_r \psi_{sdq}) + R_v I_{rdq} \quad (4)$$

Bu yerda U_{mdq} rotor tomonli quvvat o'zgartirgichining modulyasiya kuchlanishini, I_{rdqref} esa rotor tokining etalon qiymatini ifodalaydi. k_{pc} va k_{ic} parametrlari mos ravishda tok konturi boshqaruvchisining proporsional va integral koeffitsiyentlaridir.

O'tkinchi sinxronlashuv barqarorligini tahlil qilishda quvvat o'zgartirgichidagi kechikish ta'siri juda kichik deb qabul qilinadi. Shu sababli, $U_{mdq} \approx U_{rdq}$ yaqinlashuvini qo'llash mumkin. Mazkur yaqinlashuv RSC dinamikasini soddalashtirish hamda tizimning asosiy elektromagnit va sinxronlashuv jarayonlarini aniqroq tahlil qilish imkonini beradi.

Shu asosda, (3) va (4) tenglamalarni birlashtirish natijasida quyidagi ifoda hosil qilinadi:

$$(R_r + \sigma L_r \frac{d}{dt}) I_{rdq} = k_{pc} (I_{rdqref} - I_{rdq}) + k_{ic} \int (I_{rdqref} - I_{rdq}) dt - R_v I_{rdq} \quad (5)$$

$$G(s) = \frac{I_{rd}}{I_{rdqref}} = \frac{I_{rd}}{I_{rdqref}} = \frac{k_{pc}s + k_{ic}}{\sigma L_r s^2 + (R_r + R_v + k_{pc})s + k_{is}} \quad (6)$$

(5) tenglamani chastota sohasiga o'tkazish orqali rotor tokining uzatish funksiyasi quyidagi ko'rinishda hosil qilinadi:

Ushbu uzatish funksiyasi $G(s)$ bitta nol nuqta - z_1 hamda ikkita qutb - p_1 va p_2 bilan tavsiflanadi. Bunda qutblar uchun $p_1 < p_2 < 0$ shart bajariladi. Bu holat tizimning asimptotik barqaror ekanligini hamda tok konturining dinamik javobi ikki inersion tarkibiy qism orqali shakllanishini ko'rsatadi.

Shu sababli, (6) ifoda quyidagi ekvivalent ko'rinishda qayta yozilishi mumkin:

$$G(s) = \frac{k_{pc}(s - z_1)}{\sigma L_r(s - p_1)(s - p_2)} \quad (7)$$

Bu yerda nol nuqta z_1 hamda ikki qutb p_1 va p_2 quyidagi ifodalar orqali aniqlanadi:

(7) ifoda tok konturining dinamik xususiyatlarini yanada aniqroq tahlil qilish maqsadida ikki ta birinchi tartibli uzatish funksiyalarining superpozitsiyasi ko'rinishida qayta shakllantirilishi mumkin. Bunday ifodalash usuli tizimning tez va sekin dinamik komponentlarini alohida tahlil qilish, shuningdek, virtual qarshilik parametrlarining tok konturi dinamikasiga ta'sirini chuqurroq baholash imkonini beradi.

Shu asosda, (7) ifoda quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$\begin{cases} z_1 = -\frac{k_{ic}}{k_{pc}} \\ p_1 = -\frac{R_r + R_v + k_{pc} + \sqrt{(R_r + R_v + k_{pc})^2 + 4\sigma L_r k_{ic}}}{2\sigma L_r} \approx -\frac{R_r + R_v + k_{pc}}{\sigma L_r} \\ p_2 = -\frac{k_{ic}}{\sigma L_r p_1} \approx -\frac{k_{ic}}{R_r + R_v + k_{pc}} \end{cases} \quad (8)$$

$$G(s) = \underbrace{\frac{k_{pc}(p_1 - z_1)}{\sigma L_r(p_1 - p_2)(s - p_2)}}_{G_1(s)} + \underbrace{\frac{k_{pc}(z_1 - p_2)}{\sigma L_r(p_1 - p_2)(s - p_2)}}_{G_2(s)} \quad (9)$$

Virtual qarshilik ta'siri natijasida $|p_1| \gg |p_2|$ munosabati bajariladi. Bu holat p_1 qutbi bilan belgilanuvchi tok javobi juda kichik vaqt oralig'ida o'zining barqaror holatiga yetib borishini anglatadi. Mazkur vaqt shkalasi PLL dinamikasiga nisbatan ancha tez bo'lganligi sababli, ushbu dinamik komponent tizimning o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatmaydi.

Shu munosabat bilan, sinxronlashuv barqarorligini tahlil qilishda yuqori chastotali tezkor komponentlarni e'tiborsiz qoldirish va asosiy e'tiborni nisbatan sekin dinamikaga ega bo'lgan komponentlarga qaratish mumkin. Natijada, (9) ifodadagi $G_1(s)$ quyi uzatish funksiyasining chiqish komponenti quyidagicha ifodalanadi:

$$I_{rdq1} = G_1(s)I_{rdqref} = \frac{k_{pc}(p_1 - z_1)}{\sigma L_r p_1(p_1 - p_2)} e^{p_1 t} - I_{rdqref} \approx \frac{k_{pc}(p_1 - z_1)}{\sigma L_r p_1(p_1 - p_2)} - I_{rdqref} \quad (10)$$

$$I_{rdq} = I_{rdq1} + G_2(s)I_{rdqref} \quad (11)$$

$$\frac{dI_{rdq}}{dt} = \frac{p_2 k_{pc}(p_1 - z_1)}{p_1 \sigma L_r(p_1 - p_2)} I_{rdqref} + p_2 I_{rdq} + \frac{k_{pc}(z_1 - p_2)}{\sigma L_r(p_1 - p_2)} I_{rdqref} = p_2 I_{rdq} - p_2 I_{rdqref} \quad (12)$$

Aksincha, p_2 qutbi bilan boshqariladigan tok komponenti nisbatan sekin o'tkinchi jarayon xususiyatiga ega bo'lib, PLL dinamikasi bilan o'zaro bog'liq holatda saqlanib qoladi. Shu sababli, ushbu komponent tizimning o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Natijada rotor toki quyidagi ifoda orqali tavsiflanadi:

(10) va (11) tenglamalar asosida rotor tokining holat tenglamasi quyidagicha keltirib chiqariladi:

Tez qutb dinamikasini e'tiborsiz qoldirish bilan bog'liq soddalashtirishning asosli ekanligini ko'rsatish hamda keltirib chiqarishning nazariy g'oyani mustahkamlash maqsadida tizim parametrlari 1-jadvaldan olingan holda sonli tahlil amalga oshirildi.

Hisoblash natijalariga ko'ra, haqiqiy qutb qiymatlari $|p_1| = 4048$ va $|p_2| = 6,7$ ga teng bo'lib, ular mos ravishda taxminan 0,25 ms va 15 ms vaqt doimiylariga to'g'ri keladi. Ushbu natijalar p_1 qutbi

bilan boshqariladigan tok komponenti juda qisqa vaqt ichida barqarorlashishini ko'rsatadi. Shu sababli, mazkur komponentni p_2 qutbi bilan boshqariladigan sekin dinamik komponent hamda PLL dinamikasidan ajratilgan holda qarash mumkin.

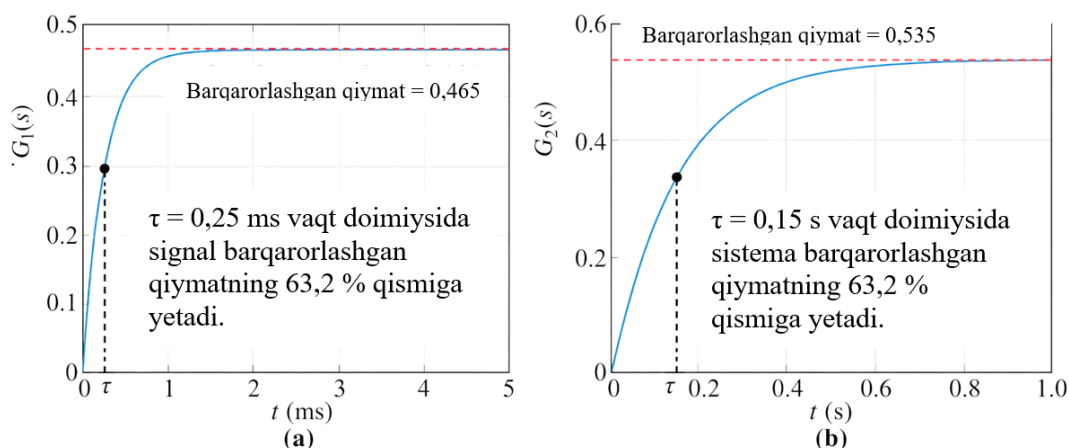
IV. TAHLIL VA NATIJALAR

2-rasmda $G_1(s)$ va $G_2(s)$ quyi uzatish funksiyalarining birlik sakrash ta'siriga bo'lgan javoblari keltirilgan bo'lib, ular tez va sekin dinamik komponentlarni ajratishning asosli ekanligini qo'shimcha ravishda tasdiqlaydi.

Xususan, $G_1(s)$ uzatish funksiyasiga mos keluvchi javob 2 ms dan kam vaqt ichida barqaror holatga yetadi, bu esa uning yuqori tezkor dinamikaga ega ekanligini ko'rsatadi. Aksincha, $G_2(s)$ uzatish funksiyasi nisbatan sekin o'tkinchi jarayonni namoyon qiladi hamda PLL dinamikasi bilan o'zaro bog'liq holda shakllanadi. Shu sababli, sinxronlashuv barqarorligini tahlil qilishda asosiy e'tibor $G_2(s)$ bilan ifodalanuvchi sekin dinamik komponentga qaratiladi.

1-jadval. DFIG asosidagi shamol turbinasi tizimi parametrlari

Parametr	Birlik	Qiymat	Parametr	Birlik	Qiymat
Nominal quvvat	P_n ; MW	1,5	Stator qarshiligi	R_s ; m Ω	2,4
Nominal kuchlanish	U_n ; V	690	Virtual qarshilik	R_v ; Ω	0,3
Nominal chastota	f_n ; Hz	50	Tarmoq qarshiligi	R_g ; m Ω	47,6
Rotor chastotasi	f_r ; Hz	55	Tarmoq induktivligi	L_g ; mH	0,5
Qutb juftlari	n_p	2	PLL kengligi	f_{bwpll} ; Hz	20
DC-shina kuchlanishi	U_{dc} ; V	1200	PLL proporsional koeffitsiyenti	k_p	0,15
Magnitlash induktivligi	L_m ; mH	4,4	PLL integral koeffitsiyenti	k_i	6,6
Rotor oqish induktivligi	L_{lr} ; mH	0,08	Tok konturi kengligi	f_{bwc} ; Hz	300
Stator oqish induktivligi	L_{ls} ; mH	0,06	Tok konturi proporsional koeffitsiyenti	k_{pc}	0,26
Rotor qarshiligi	R_r ; m Ω	2	Tok konturi integral koeffitsiyenti	k_{ic}	3,77



2-rasm. Quyi uzatish funksiyalarining birlik sakrashga javoblari: (a) $G_1(s)$; (b) $G_2(s)$

O'tkinchi sinxronlashuv jarayoni davomida stator magnit oqimi ψ_{sdq} da taxminan 50 Hz atrofida yuqori chastotali tebranishlar yuzaga kelishi mumkin. Biroq ushbu tebranishlarning PLL dinamikasiga ta'siri amalda e'tiborga olmas darajada kichik deb hisoblanadi.

Buning asosiy sababi shundaki, mazkur tebranishlar yuqori chastotali hamda nol o'rtacha qiymatga ega quvvat komponentlariga tegishli bo'lib, ular umumiy aktiv quvvat balansiga sezilarli hissa qo'shmaydi. Natijada virtual quvvat burchagini shakllantiruvchi asosiy dinamik jarayonlarga bevosita ta'sir ko'rsatmaydi.

Sinxron generatorlar nazariyasidagi klassik yondashuvlarga o'xshash ravishda, bu yerda ham quvvat chastotasidagi o'tkinchi magnit oqimi tebranishlari rotor burchak barqarorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatmaydi. Shuningdek, PLL tizimining cheklangan o'tkazish kengligi sababli 50 Hz atrofidagi komponentlar samarali filtrlanadi va sinxronlashuvning sekin dinamik jarayonlariga ta'sir ko'rsatmaydi.

Shu sababli, ψ_{sdq} kattaligi doimiy qiymat sifatida, ya'ni uning o'rtacha qiymati ψ_{sdqave} bilan yaqinlashtiriladi.

(2) va (12) tenglamalarni birlashtirish orqali stator tokining holat tenglamasi quyidagi ko'rinishda keltirib chiqariladi:

$$\frac{dI_{sdq}}{dt} = p_2 I_{sdq} + \frac{p_2}{L_s} \psi_{sdq_ave} - \frac{p_2 L_m}{L_s} I_{rdqref} \quad (13)$$

PLL dinamikasi quyidagicha tavsiflanadi:

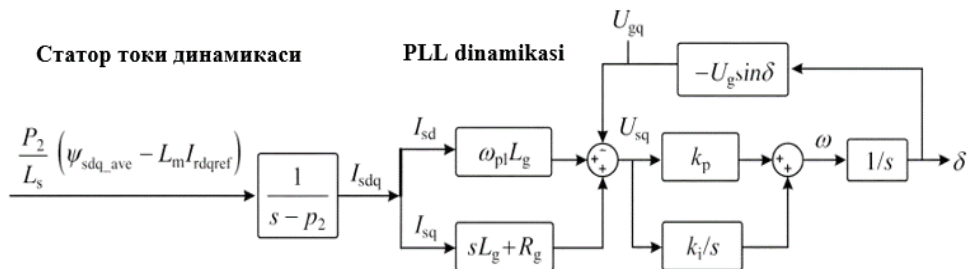
$$\begin{cases} U_{sd} = -U_g \sin \delta + \omega_{pll} L_g I_{sd} + R_g I_{sq} + L_g \frac{dI_{sq}}{dt} \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega \\ \frac{d\omega}{dt} = k_p \frac{dU_{sq}}{dt} + k_i U_{sq} \end{cases} \quad (14)$$

bu yerda $\delta = \theta_{pll} - \theta_g$, $\omega = \omega_{pll} - \omega_g k_p$ ni ifodalaydi. k_p va k_i mos ravishda PLL ning proporsional va integral koeffitsiyentlaridir.

(13) va (14) tenglamalar asosida DFIG asosidagi shamol turbinasi uchun to'rtinchi tartibli o'tkinchi sinxronlashuv modeli ishlab chiqildi va ushbu model 3-rasmida keltirilgan. Mazkur model to'rtta holat o'zgaruvchisini o'z ichiga oladi: $[I_{sd}, I_{sq}, \delta, \omega]$, ular stator tok dinamikasi hamda PLL dinamikasini to'liq tavsiflaydi.

An'anaviy ikkinchi tartibli PLL modellari stator tok dinamikasini hisobga olmaganligi sababli, virtual qarshilik boshqaruviga ega bo'lgan tizimlarning o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligini aniq va to'liq baholash imkonini bermaydi. Shuningdek, [19,20] kabi tadqiqotlarda PLL odatda doimiy barqaror holatda deb qabul qilinib, tahlil asosan faqat tok konturi dinamikasi bilan cheklangan. Bu esa o'tkinchi sinxronlashuv jarayonlarini kompleks baholash imkoniyatini sezilarli darajada cheklaydi.

Taklif etilgan model virtual qarshilikka asoslangan boshqaruv sharoitida stator tok dinamikasi va PLL dinamikasini bir vaqtda hisobga olish imkonini beradi hamda mavjud modellardagi asosiy cheklovlarni bartaraf etadi. Natijada tizimning o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligini aniqroq tahlil qilish va baholash uchun mukammal nazariy asos yaratiladi.



3-rasm. DFIG asosidagi shamol turbinasi uchun to'rtinchi tartibli o'tkinchi sinxronlashuv modeli

Taklif etilgan to'rtinchi tartibli modelning adekvatligini tekshirish maqsadida DFIG asosidagi shamol turbinasi uchun MATLAB R2024a/Simulink muhitida simulyasiya tizimi ishlab chiqildi. Tizim parametrlari 1-jadvalda keltirilgan.

O'rta darajadagi avariya holati yuzaga kelib, tarmoq kuchlanishi 0,55 gacha pasayganda, DFIG asosidagi shamol turbinasi tarmoq kuchlanishini qo'llab-quvvatlash maqsadida reaktiv tok injeksiyasini amalga oshiradi. Bu holatda tizimning ish rejimi sof aktiv tok chiqishidan 1,0 aktiv tok holatidan 0,9 aktiv tok va -0,45 reaktiv tokdan iborat aralash chiqish rejimiga o'tadi.

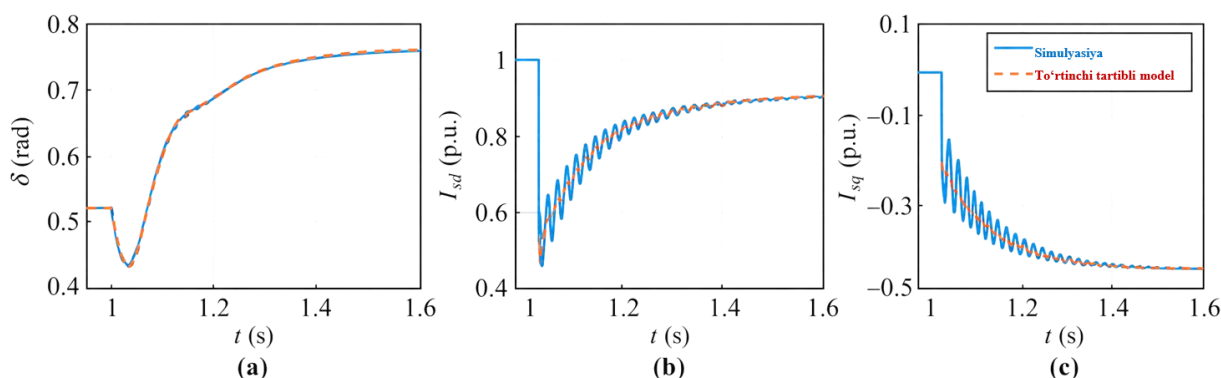
4-rasmda simulyasiya natijalari hamda taklif etilgan to'rtinchi tartibli model uchun mos keluvchi o'tkinchi jarayon signallari keltirilgan. Simulyasiya natijalariga ko'ra, stator tokida taxminan 50 Hz atrofida yuqori chastotali tebranishlar kuzatiladi. Bu holat stator magnit oqimining tabiiy dinamikasi bilan bog'liq bo'lib, tizimning elektromagnit o'tkinchi jarayonlarida yuzaga keladi.

Biroq avval ta'kidlanganidek, stator magnit oqimidagi ushbu yuqori chastotali tebranishlar PLL dinamikasiga sezilarli ta'sir ko'rsatmaydi. Shuningdek, stator tokida kuzatiladigan yuqori chastotali komponentlar ham PLLning sekin dinamik jarayonlariga ta'sir etmaydi, bu esa taklif etilgan modelning sinxronlashuv barqarorligini baholashda to'g'ri ekanligini tasdiqlaydi.

Shu sababli, taklif etilgan to'rtinchi tartibli model mazkur yuqori chastotali tebranishlarni to'liq modellashtirishga yo'naltirilmagan bo'lib, asosiy e'tibor virtual qarshilik ta'sirida shakllanadigan stator tokining sekin o'tkinchi dinamikasini aks ettirishga qaratiladi.

Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, to'rtinchi tartibli modeldagi tok dinamikasi simulyasiyada kuzatilgan tokning umumiy tendensiyasi bilan yuqori darajada mos keladi. Shuningdek, model orqali hisoblangan PLL burchagi δ simulyasiya natijalari bilan sezilarli darajada muvofiqlikni namoyon etadi.

δ parametrining aniqligini miqdoriy baholash maqsadida har 1 ms oraliqda olingan ma'lumotlar asosida o'rta kvadrat xatolik hisoblandi. Hisoblash natijasi 0,003 rad ni tashkil etdi, bu esa taklif etilgan modelning yuqori aniqlikka ega ekanligini tasdiqlaydi.

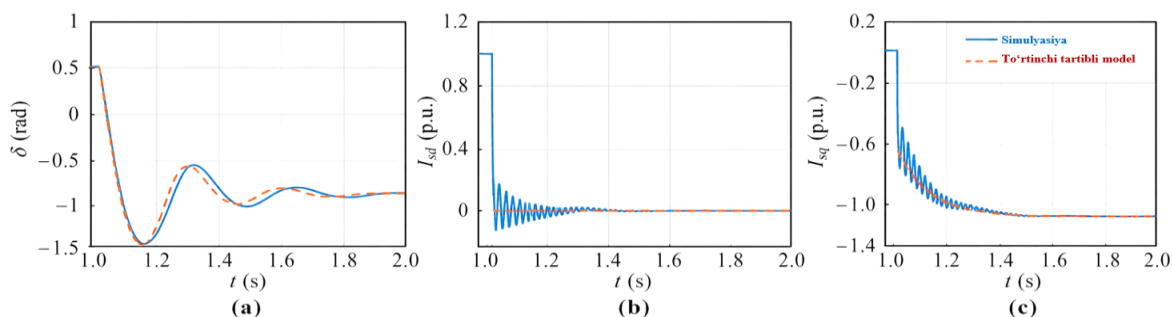


4-rasm. O'rta darajali tarmoq avariylari vaqtida simulyasiya va to'rtinchi tartibli modelning o'tkinchi signallari. (a) PLL burchagi δ signallari; (b) d -o'q stator toki I_{sd} signallari; (c) q -o'q stator toki I_{sq} signallari

Jiddiy avariya holati yuzaga kelib, tarmoq kuchlanishi 0,2 gacha pasayganda, DFIG asosidagi shamol turbinasi tarmoqqa -1,0 reaktiv tok injeksiya qiladi. Simulyasiya natijalari hamda taklif etilgan to'rtinchi tartibli model uchun mos keluvchi o'tkinchi jarayon signallari 5-rasmda keltirilgan.

O'rta darajali avariya holati bilan solishtirganda, mazkur rejimda modellashtirish xatoligi biroz ortishi kuzatilsa-da, matematik model tomonidan bashorat qilingan tok dinamikasi va PLL burchagi simulyasiya natijalari bilan hali ham yuqori darajada muvofiqlikni saqlab qoladi.

Ushbu jiddiy avariya sharoitida PLL burchagi uchun hisoblangan o'rta kvadrat xatolik qiymati 0,077 rad ni tashkil etadi. Olingan natijalar taklif etilgan modelning DFIG asosidagi shamol turbinalarining o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligini baholashda yetarlicha aniq va samarali ekanligini tasdiqlaydi.



5-rasm. Jiddiy tarmoq avariylari vaqtida simulyasiya va to'rtinchi tartibli modelning o'tkinchi signallari. (a) PLL burchagi δ signallari; (b) d -o'q stator toki I_{sd} signallari; (c) q -o'q stator toki I_{sq} signallari

V. XULOSA VA TAKLIFLAR

Ushbu maqolada tarmoq avariylari sharoitida DFIG asosidagi shamol turbinalarining o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligi har tomonlama tahlil qilindi va asosiy e'tibor virtual qarshilikka asoslangan demagnitlash boshqaruvining tizim dinamikasiga ta'siriga qaratildi. Matematik modellash, nazariy tahlil hamda simulyasiya orqali tasdiqlash natijalari asosida ushbu ishning asosiy ilmiy hissalari quyidagicha umumlashtirildi:

(1) Virtual qarshilikka asoslangan demagnitlash boshqaruvi bilan fazaga qulflangan halqa (PLL) dinamikasi o'rtasidagi o'zaro bog'lanishni aniq ifodalovchi yangi to'rtinchi tartibli o'tkinchi sinxronlashuv modeli ishlab chiqildi. Ushbu model tarmoq avariylari sharoitida tizimning dinamik xulq-atvorini an'anaviy ikkinchi tartibli PLL modellariga nisbatan ancha aniq va kompleks ravishda aks ettiradi.

(2) Virtual qarshilik boshqaruvi ta'sirida yuzaga keladigan o'tkinchi quvvat hadlari hamda musbat dempirlash (so'ndirish) komponentlari ilk bor nazariy jihatdan aniqlandi. Ushbu hadlar o'tkinchi sinxronlashuv barqarorligini oshirishda hal qiluvchi ahamiyatga ega ekanligi ko'rsatildi hamda virtual qarshilik boshqaruvining tizimni barqarorlashtiruvchi mexanizmiga yangi ilmiy yondashuv taqdim etildi.

(3) Virtual qarshilik hamda rotor tok konturining proporsional–integral parametrlarining o'tkinchi barqarorlikka ta'siri tizimli ravishda tahlil qilindi. Nazariy natijalar shuni ko'rsatadiki, virtual qarshilik qiymatini oshirish hamda tok konturining integral kuchaytirish koeffitsiyentini kamaytirish sinxronlashuv barqarorligini sezilarli darajada yaxshilaydi va boshqaruv parametrlarini optimallashtirish uchun aniq amaliy yo'riqnomani shakllantiradi.

Shunga qaramay, ushbu tadqiqot bir qator cheklovlarga ega. Birinchi cheklov ideallashtirilgan tok konturi farazidan kelib chiqadi. Amalda kuchlanish buzilishlarining tok konturiga ta'siri deкупling va fidforvard hadlari orqali to'liq kompensatsiya qilinmasligi mumkin. Shuningdek, modulyasiya to'yinishi va o'lik zona kabi noxiziqli xususiyatlar ushbu modelda hisobga olinmagan.

Ikkinchi cheklov ideal tarmoq modelini qabul qilish bilan bog'liq bo'lib, u doimiy Tevenen ekvivalent impedansiga ega tizim sifatida qaraladi. Bu yondashuv kuchsiz tarmoqlar yoki qayta tiklanuvchi energiya manbalari yuqori darajada integratsiya qilingan tizimlarni to'liq aks ettirmasligi mumkin, chunki bunday holatlarda tarmoq impedansi chastota va yuklama sharoitlariga bog'liq ravishda o'zgaruvchan xarakterga ega bo'ladi.

Kelgusi tadqiqotlarda virtual qarshilikka asoslangan boshqaruv strategiyasining baholanishi yanada murakkab tarmoq sharoitlari va turli avariya ssenariylariga, jumladan, nosimmetrik avariylar, chastota og'ishlari hamda kuchli o'zgaruvchan va kuchsiz tarmoq rejimlariga kengaytirilishi mumkin. Bu esa mazkur boshqaruv usulining turli ish rejimlaridagi barqarorlik xususiyatlarini to'liq va kompleks baholash imkonini beradi.

Bundan tashqari, ushbu tadqiqot natijalarini ko'p mashinali elektr energetika tizimlariga tatbiq etish muhim yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Bunday holatda o'zaro ulangan generatorlar muhitida virtual qarshilik boshqaruvining o'zaro ta'sir mexanizmlari o'rganilib, uning tizim tebranish rejimlari hamda global sinxronlashuv barqarorligiga ta'siri chuqur tahlil qilinadi.

Shu bilan birga, bir qator ilmiy-amaliy muammolar yuzaga kelishi mumkin, jumladan, bir nechta PLL tizimlari o'rtasidagi o'zaro bog'lanish ta'sirlarini aniqlash va miqdoriy baholashning murakkabligi hamda kommunikatsiya kechikishlarining virtual qarshilik boshqaruvi va sinxronlashuv strategiyalari muvofiqligiga ehtimoliy salbiy ta'siri.

Ushbu muammolarni bartaraf etish uchun ilg'or matematik modelashtirish usullari, barqaror va adaptiv boshqaruv algoritmlari hamda samarali aloqa protokollarini ishlab chiqish zarur bo'ladi. Mazkur yo'nalishlar kelgusi tadqiqotlarda batafsil o'rganilishi rejalashtirilgan.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Toirov O.Z., Taniyev M.X., Xalikov S.S., Safarov Amaldagi tarmoq bilan parallel ishlovchi boshqariluvchi shamol elektr qurilmasi // O'zbekiston Respublikasi adliya vazirligi huzuridagi «Intellectual mulk markazi». Foydali modelga patent. - Tashkent, 2023. № FAP 2023 0311. 30.08.2023.
- [2] Toirov O., Atoev S., Sadullaev T., & Jumaeva D. (2024, June). Energy-saving operating modes and functional diagrams of a cotton-cleaning device based on frequency-controlled electric drives. In *American Institute of Physics Conference Series* (Vol. 3152, No. 1, p. 030016).
- [3] Toirov O., Sadullaev T., Abdullaev D., Jumaeva D., Ergashev Sh., Sapaev I.B. 2023 Development of contactless switching devices for asynchronous machines in order to save energy and resources, *E3S Web of Conferences* 383, 01029.
- [4] Toirov O.Z., Taniyev M.X. Sotiboldiev A.A. Questions of Control of Asynchronous Generators Used at HPP and WPP Stations // *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. India. 2022. - Vol. 9, Issue 4, April 2022. ISSN: 2350-0328. PP. 19260-19265.
- [5] Toirov O.Z. Taniyev M.X. Shamol elektr stansiyalarida asinxron generatorlarni qo'llash imkoniyatlari // "Energiya va resurs tejash muammolari" ilmiy-texnik jurnali. - Tashkent, 2022. Maxsus son. 283-288 b.
- [6] Toirov O.Z., Taniyev M.X. Qayta tiklanuvchi energiya manbalarida asinxron generatorning fazalari ulanish sxemasining chiqish kuchlanishiga ta'siri // "O'zbekgidroenergetika" ilmiy-texnik jurnali. - Toshkent, 2022. №2(14). 70-72.
- [7] Toirov O.Z., Taniyev M.X. Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridagi elektromexanik tizimlarda quvvat isrofi va energiya balansi // "Informatika va energetika muammolari". - Toshkent, 2022. №5. 44-54 b.
- [8] Taniyev M.X., Shernazarov S.E., Ubaydullayev M.M. MikroGESlardagi faza rotorli asinxron mashina mexanik tavsifini hisoblash // "O'zbekgidroenergetika" ilmiy-texnik jurnali. - Tashkent, 2021. №3(11). 29-31 b.
- [9] Alimxodjayev K.T., Taniyev M.X., Zaxidov O.U. Asynchronous phase rotor generators for power planes operating parallel with a network // *Vestnik TashIIT*. - Tashkent, 2019. №4. S. 79-86.
- [10] Toirov O., Taniyev M., Hamdamov M., Sotiboldiev A. Power Losses Of Asynchronous Generators Based On Renewable Energy Sources // *E3S Web of Conferences* 434, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401020>, ICECAE 2023, P. 122-127.
- [11] Alimkhodjaev K.T., Toirov O.Z., Taniyev M.X. Addressing Issues and Possibility of Introducing Renewable Energy Sources in the Conditions of Uzbekistan // *Journal of critical reviews* Vol. 7, Issue 15, 2020. P. 1721-1728.
- [12] Taniyev M., Mirkhonov U., Rakhmatova M., Isakov F., Ergashov Sh., Nizamov J. Study of the substitution scheme of the parameters of a phase-rotor induction generator // *AIP Conference Proceedings*, <https://doi.org/10.1063/5.0130746> 05, January 2023. P. 215-220.
- [13] Toirov O.Z., Taniyev M.X., Mirxonov U.K. Faza rotorli asinxron mashinaning aylanish chastotasini qarshiliklarni rostlash orqali boshqarish hamda energetik ko'rsatkichlarini oshirish metodikasi // O'zbekiston Respublikasi adliya vazirligi huzuridagi «Intellectual mulk markazi» davlat muassasasi. - Toshkent №DGU 16169.14.05.2022.

- [14] Toirov O.Z., Taniyev M.X., Mirxonov U.K., Sa'dullaev T.M. Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridagi faza rotorli asinxron generatorlarning quvvat isroflarini hisoblash metodikasi // O'zbekiston Respublikasi adliya vazirligi huzuridagi «Intellectual mulk markazi» davlat muassasasi. - Toshkent. № DGU 14882. 07.03.2022.
- [15] Toirov O.Z., Taniyev M.X. Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridagi elektromexanik tizimlar // «Iqtisodiyotni raqamlashtirish sharoitlarida energetikaning dolzarb muammolari» mavzusidagi Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari. – Buxoro, 24-26 noyabr 2022. 200-202 b.
- [16] Toirov O.Z., Taniyev M.X. Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridagi asinxron generatorlarda quvvat isrofi // “Avtomatlashtirilgan elektromexaniye va elektrotexnologik tizimlarda raqamlashtirishning dolzarb muammolari va energiya samaradorligini oshirish” mavzusidagi Xalqaro ilmiy-texnik konferensiyasi materiallari. - Toshkent, 2023. 128-131 b.
- [17] Taniyev M.X., Alimxodjayev K.T. Qayta tiklanadigan energiya manbalar foydalanish masalalarining yechish // “Innovation texnika va texnologiyalarning qishloq xo'jaligi - oziq-ovqat tarmog'idagi muammo va istiqbollari” mavzusidagi xalqaro ilmiy va ilmiy-texnik anjumani. –Toshkent, 24-25 aprel 2020. 713-715 b.
- [18] Toirov O.Z., Taniyev M.X., O'roqov S.E., Shernazarov S.E. Shamol elektr stansiyalarida asinxron generatorlarni qo'llash imkoniyatlari // “Avtomatlashtirilgan elektromexanik va elektrotexnologik tizimlarda raqamlashtirishning dolzarb muammolari va energiya samaradorligini oshirish”. - Tashkent, 25-26 may 2023. 388-390 b.
- [19] Toirov O.Z., Taniyev M.X., O'roqov S.E., Shernazarov S.E. Shamol elektr stansiyalarida faza rotorli asinxron generatorlarning mexanik tavsifi // “Avtomatlashtirilgan elektromexanik va elektrotexnologik tizimlarda raqamlashtirishning dolzarb muammolari va energiya samaradorligini oshirish”. - Toshkent, 25-26 may 2022. 358-360 b.
- [20] Heng Wu va Xiongfei Wang. Design-Oriented Transient Stability Analysis of PLL-Synchronized Voltage-Source Converters. IEEE Transactions on Power Electronics. 2020.