ISNN 3030-3907

2026/3
VOLUME 6

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/3 VOLUME 6

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Асадова Раъно Дилмуратовна
Тошкент Давлат техника университети доценти

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

МУҚОБИЛ ЭНЕРГИЯ МАНБАЛАРИ ИНВЕРТОРЛАРИ УЧУН ТАКОМИЛЛАШТИРИЛГАН БОШҚАРУВ ТИЗИМИНИНГ МАТЕМАТИК МОДЕЛИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ

Ибрагимова Х.И.

Навоий давлат кончилик ва технологиялар университети "Электр энергетикаси" кафедраси ассистенти.

E-mail: ikhusniya@list.ru

Кадиров К.Ш.

Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси, Энергетика муаммолари институти, "Энергия самарадорлиги ва энергия тежаш тизимлари" лабораторияси мудири.

E-mail: kamoliddin.8484@mail.ru

Аннотация. мақолада қуёш электр станциялари инверторларидан тармоққа узатиладиган электр энергияси сифатини ошириш масалалари кўриб чиқилган. dq-координаталарда LCL-фильтрли инверторнинг математик модели ишлаб чиқилган ҳамда гармоник бузилишлар ва резонанс жараёнларини камайтиришга қаратилган бошқарув алгоритми таклиф этилган. Олинган натижалар тармоқ инверторларининг барқарорлиги ва энергия самарадорлигини оширишда қўлланилиши мумкин.

Калит сўзлар: инвертор, LCL-фильтр, гармоникалар, математик модель, dq-координаталар, PI-регулятор, актив демпфирлаш, электр энергияси сифати, қуёш электр станцияси, тармоқ инвертори.

Аннотация. в статье рассматриваются вопросы повышения качества электрической энергии, передаваемой в сеть инверторами солнечных электростанций. Разработана математическая модель инвертора с LCL-фильтром в dq-координатах и предложен алгоритм управления, обеспечивающий снижение гармонических искажений и подавление резонансных процессов. Полученные результаты могут быть использованы для повышения устойчивости и энергоэффективности сетевых инверторов.

Ключевые слова: инвертор, LCL-фильтр, гармоники, математическая модель, dq-координаты, PI-регулятор, активное демпфирование, качество электроэнергии, солнечная электростанция, сетевой инвертор.

Annotation. this article considers the problem of improving the quality of electric power delivered to the grid by solar power plant inverters. A mathematical model of an inverter with an LCL filter in dq coordinates was developed, and a control algorithm was proposed to reduce harmonic distortion and suppress resonance processes. The obtained results can be used to improve the stability and energy efficiency of grid-connected inverters.

ISSN 3030-3907

Keywords: inverter, LCL filter, harmonics, mathematical model, dq coordinates, PI controller, active damping, power quality, solar power plant, grid-connected inverter.

КИРИШ.

Қайта тикланувчи энергия манбаларининг жадал ривожланиши шароитида умумий электр тармоғига узатилаётган электр энергияси сифатини юқори даражада таъминлаш энг муҳим илмий-техник вазифалардан бирига айланмоқда. Ушбу муаммо, айниқса, доимий токни фотоэлектрик модуллардан саноат частотасидаги ўзгарувчан токка айлантирувчи кучли яримўтказгичли ўзгартгичлар кенг қўлланилаётган қуёш электр станциялари учун долзарб ҳисобланади. Замонавий инвертор тизимларининг самарадорлиги юқори бўлишига қарамасдан, уларнинг иш жараёнида куч калитларининг коммутацияси туфайли ток ва кучланиш шаклининг бузилиши кузатилади. Бу эса юқори тартибли гармоникаларнинг пайдо бўлишига, қўшимча қувват йўқотишларига, электромагнит мослашувнинг ёмонлашувига ҳамда электроэнергетика тизими барқарорлигининг пасайишига олиб келади.

Қуёш электр станцияларини тармоққа улаш жараёнида инверторнинг чиқишидаги электр энергияси сифати гармоник бузилиш коэффициенти, реактив қувват даражаси, фазалар симметрияси ва частота барқарорлиги бўйича амалдаги меъёрий талабларга жавоб бериши лозим. Бироқ инверторларни бошқаришнинг анъанавий схемалари гармоникаларни самарали фильтрлаш билан бир вақтда тизимнинг динамик хусусиятларини юқори даражада сақлаб қолиш имконини ҳар доим ҳам бермайди. Амалиётда юқори частотали ташкил этувчиларни пасайтириш учун кенг қўлланиладиган LCL-фильтр оддий L ва LC фильтрларга нисбатан юқори самарадорликка эга. Шу билан бирга, LCL-фильтрдан фойдаланиш резонанс ҳодисаларининг юзага келишига сабаб бўлади, бу эса тебраниш жараёнлари кучайишига, тизим барқарорлигининг пасайишига ва тармоққа узатилаётган электр энергияси сифати ёмонлашишига олиб келиши мумкин.

АДАБИЁТЛАР ТАҲЛИЛИ.

Сўнгги йилларда қайта тикланувчи энергия манбаларини электр тармоқларига интеграция қилиш соҳасида олиб борилган тадқиқотларда тармоққа узатилаётган электр энергияси сифатини таъминлаш масаласига алоҳида эътибор қаратилмоқда [1]. Айниқса, қуёш электр станцияларида қўлланиладиган тармоқ инверторларининг чиқиш параметрларини меъёрий талаблар даражасида ушлаб туриш, юқори тартибли гармоникаларни камайтириш, реактив қувватни бошқариш ва динамик барқарорликни

ISSN 3030-3907

таъминлаш муҳим илмий-техник вазифалардан бири ҳисобланади [2]. Анъанавий тармоқ инверторлари куч калитларининг юқори частотали коммутацияси натижасида ток ва кучланиш шаклида гармоник бузилишларни юзага келтиради [3]. Бу электр энергияси сифатига салбий таъсир кўрсатиб, қўшимча қувват йўқотишлари, электромагнит мослашувнинг ёмонлашуви ва тизим барқарорлигининг пасайишига олиб келади [4]. Шу сабабли инвертор чиқишида юқори частотали ташкил этувчиларни самарали фильтрлаш бўйича турли ёндашувлар ишлаб чиқилган.

Илмий манбаларда гармоникаларни пасайтиришнинг самарали воситаларидан бири сифатида LCL-фильтрлар кенг кўламда кўриб чиқилган [5]. Уларнинг асосий афзаллиги L ва LC фильтрларга нисбатан юқори фильтрлаш қобилиятига эгалигидир. Хусусан, LCL-фильтр юқори частотали гармоникаларни самарали сусайтириш орқали тармоққа узатилаётган ток сифатини яхшилайди [6]. Бироқ қатор тадқиқотларда қайд этилганидек, мазкур фильтр тури резонанс ҳодисаларини келтириб чиқариши мумкин, бу эса ток ва кучланиш тебранишларига, бошқарув жараёнининг мураккаблашишига ҳамда тизим барқарорлигининг пасайишига сабаб бўлади [7]. Мавжуд илмий ишларда LCL-фильтрли инверторларда резонансни бартараф этиш учун асосан пассив ва актив демпфирлаш усуллари таклиф қилинган [8]. Пассив демпфирлашда қўшимча резистив элементлар қўлланилиб, резонанс амплитудаси камайтирилади. Аммо кўплаб муаллифлар ушбу ёндашувнинг асосий камчилиги сифатида қўшимча энергия йўқотишлари, фойдали иш коэффициентининг пасайиши ва умумий энергия самарадорлигининг камайишини таъкидлайдилар [9]. Шу боис кейинги тадқиқотларда пассив усулларга муқобил равишда актив бошқарувга асосланган ечимларга қизиқиш ортиб бормоқда.

Замонавий тадқиқотларда тармоқ инверторларини таҳлил қилиш ва бошқаришда синхрон айланувчи dq координаталар тизими кенг қўлланилмоқда [10]. Ушбу усул уч фазали электр катталикларини соддалаштирилган икки каналли кўринишга келтириш имконини беради, токнинг актив ва реактив ташкил этувчиларини ажратиш, уларни мустақил бошқариш ҳамда тармоқ ўзгартгичининг бошқарув сифатини оширишга хизмат қилади [11]. dq координаталарида қурилган моделлар асосида PI-регуляторлар ёрдамида статик хатоликларни камайтириш, динамик жараёнларни яхшилаш ва токни аниқ бошқариш имконияти мавжудлиги илмий жиҳатдан асосланган [12]. Шунингдек, адабиётларда decoupling-компенсация усулларидан фойдаланиш d ва q ўқлари ўртасидаги ўзаро

ISSN 3030-3907

таъсирни бартараф этишда муҳим аҳамиятга эгалиги кўрсатилган [13]. Бу эса актив ва реактив қувватларни мустақил бошқариш, бошқарув тизимининг тезкорлигини ошириш ва ташқи таъсирлар ўзгарганда ҳам барқарор ишлашни таъминлаш имконини беради [14]. Сўнгги илмий ишлар таҳлили шуни кўрсатадики, актив демпфирлаш алгоритмлари LCL-фильтрли инверторларда резонансни пассив элементларсиз бартараф этишнинг энг истиқболли йўналишларидан бири ҳисобланади [15]. Бундай ёндашувларда резонанс ҳодисаси дастурий йўл билан сусайтирилади, бу эса қувват йўқотишларини камайтириш, қурилманинг фойдали иш коэффициентини сақлаш ва электр энергияси сифатини халқаро талаблар даражасига яқинлаштириш имконини беради [16]. Хусусан, электр энергияси сифати бўйича THD < 5 % талабини таъминлаш учун инверторнинг математик модели ва бошқарув алгоритми етарлича аниқ ва барқарор бўлиши зарур [17]. Шундай қилиб, адабиётлар таҳлилидан кўринадики, қуёш электр станциялари тармоқ инверторларида электр энергияси сифатини ошириш муаммоси ҳозирги кунгача долзарблигини сақлаб қолмоқда. Мавжуд тадқиқотларда LCL-фильтрларнинг гармоникаларни камайтиришда юқори самарадорлиги исботланган бўлса-да, уларда юзага келадиган резонанс жараёнларини қўшимча энергия йўқотишларисиз бартараф этиш масаласи тўлиқ ечимини топмаган. Шу нуқтаи назардан, Кирхгоф қонунларига асосланган, синхрон dq координаталар тизимида ифодаланган, decoupling-компенсация ва active damping алгоритмларини ўз ичига олган такомиллаштирилган математик моделни ишлаб чиқиш муҳим илмий аҳамиятга эга.

ТАДҚИҚОТ МЕТОЛОГИЯСИ.

Инвертордаги индуктив ғалтакдаги кучланишлар баланси (Кирхгофнинг II-қонуни). Инвертор кучланиши (U_{inv}) ҳамда ундаги конденсаторнинг кучланиши (U_{kond}) орасидаги фарқ биринчи индуктив ғалтакда (L_1) ток ўзгаришиларини юзага келтиради (қаршиликларни назарий соддалаштирамиз):

$$U_{\text{инв,АБС}} - U_{\text{конд,АБС}} = L_1 \frac{dI_{1,ABC}}{dt} \qquad (1)$$

Бу ерда, $U_{\text{инв,АБС}}$ - Инверторнинг чиқиш кучланиши (АБС уч фазали учун) [В];

$U_{\text{конд,АБС}}$ - LCL-фильтр конденсаторидаги кучланиш [В];

L_1 - Инвертор томонидаги индуктив ғалтакнинг индуктивлиги [Gn];

$I_{1,ABC}$ - Инвертордан чиқиб, L_1 индуктив ғалтак орқали оқаётган ток [А];

t – вақт ўзгариши [с].

ISSN 3030-3907

Тармоқ индуктив ғалтагидаги кучланишлар баланси: Конденсатор ва электр тармоғи ($U_{\text{тарм}}$) орасидаги муносабат иккинчи индуктив ғалтакни (L_2) ифодалайди:

$$U_{\text{конд,АБС}} - U_{\text{тарм,АБС}} = L_2 \frac{dI_{2,ABC}}{dt} \quad (2)$$

Bu yerda, $U_{\text{тарм,АБС}}$ – умумий электр тармоғининг кучланиши [В];

L_2 - тармоқ томонидаги индуктив ғалтакнинг индуктивлиги [Gn];

$I_{2,ABC}$ - умумий электр тармоғига узатилаётган ток [А];

Тугундаги умумий токларининг баланси (Кирхгофнинг I-қонунига асосан): Инвертордан чиққан ток ($I_{1,ABC}$) тармоққа кетаётган ток ($I_{2,ABC}$) ва конденсатор орқали ерга оқувчи токка ($I_{\text{конд}}$) бўлинади:

$$I_{1,ABC} = I_{2,ABC} + I_{\text{конд}} \quad (3)$$

Бу ерда, $I_{\text{конд}}$ - конденсатор орқали оқиб ўтувчи ток [А];

Конденсаторнинг дифференциал хоссаси: Конденсатор токи ундаги кучланишнинг вақт бўйича ҳосиласига тенг:

$$I_{\text{конд}} = C_{\text{конд}} \frac{dU_{\text{конд,АБС}}}{dt} \quad (4)$$

Бу ерда, $C_{\text{конд}}$ - LCL-фильтр конденсаторининг сиғими [Ф]

$\frac{dU_{\text{конд,АБС}}}{dt}$ - конденсатордаги кучланишнинг вақт бўйича ўзгариш тезлиги.

Тизимнинг умумлашган тенгламасини тузиш: (1), (2), (3) тенгламаларни бирлаштириб, тизимнинг АБС фазалардаги кўринишини қуйдагича келтирамиз:

$$U_{\text{инв,АБС}} = (L_1 + L_2) \frac{dI_{2,ABC}}{dt} + U_{\text{тарм,АБС}} + L_1 \frac{dI_{\text{конд,АБС}}}{dt} \quad (5)$$

Роберт Парк вектори: Ўзгарувчан синусоидал сигналларни бошқариш қийинлиги сабабли, $АБС$ фазаларни ω тезликда айланувчи dq фазовий векторга ўтказамиз:

$$X_{dq} = X_{ABC} \cdot e^{-j\omega t} \quad (6)$$

Бу ерда, X_{dq} - кучланиш ёки токнинг айланувчи dq координаталардаги комплекс вектори.

X_{ABC} - кучланиш ёки токнинг қўзғалмас АБС фазалардаги вектори.

$e^{-j\omega t}$ - тармоқ частотаси билан айланувчи Роберт Парк оператори.

ω - тармоқнинг бурчак тезлигию

Айланувчи фазодаги ҳосила қоидаси: Вектор айланаётгани сабабли, вақт бўйича ҳосила олинганда (Эйлер формуласига асосан) қўшимча ω (айланиш) параметри ҳосил бўлади:

$$\frac{d}{dt}\left(X_{dq} e^{j\omega t}\right) = \left(\frac{dX_{dq}}{dt} + j\omega X_{dq}\right) e^{j\omega t} \quad (7)$$

ISSN 3030-3907

dq фазосидаги комплекс тенглама: (7) формуладаги ҳосила олинганда, (8) формулага қўядиган бўлсак, тизимнинг комплекс математик модели пайдо бўлади:

$$U_{\text{инв},dq} = (L_1 + L_2)\frac{dI_{2,dq}}{dt} + j\omega(L_1 + L_2)I_{2,dq} + U_{\text{тарм},dq} + U_{L1,\text{конд},dq} \quad (8)$$

Бу ерда, $U_{\text{инв},dq}$ - инвертор кучланишининг dq фазосидаги вектори.

$I_{2,dq}$ - тармоққа узатилаётган токнинг dq фазосидаги вектори.

$U_{\text{тарм},dq}$ - тармоқ кучланишининг dq фазосидаги вектори.

$U_{L1,\text{конд},dq}$ - конденсатор токининг ўзгариши сабабли L_1 индуктив ғалтакда юзага келувчи кучланиш тушиши.

Актив қувват (d-ўқи) тенгламанинг фақат ҳақиқий қисмларини ажратамиз. Бу ерда $-\omega(L_1 + L_2)I_q$ пайдо бўлади (бу фазаларнинг бир-бирига халақит беришидир):

$$U_{\text{инв},d} = (L_1 + L_2)\frac{dI_{2,d}}{dt} - \omega(L_1 + L_2)I_{2,q} + U_{\text{тарм},d} + U_{L1,\text{конд},d} \quad (9)$$

Бу ерда, $U_{\text{инв},d}$, $U_{\text{тарм},d}$ - инвертор ва тармоқ кучланишининг актив ташкил этувчилари.

$I_{2,d}$ - тармоқ токининг актив ташкил этувчиси.

$I_{2,q}$ - тармоқ токининг реактив ташкил этувчиси (айнан мана шу элемент d - ўқида халақитни юзага келтиради).

Реактив қувват (q-ўқи) (8) тенгламанинг мавҳум (j) қисмларини ажратамиз. Бу ерда ҳам $\omega(L_1 + L_2)I_d$ халақит берувчи қисм бор:

$$U_{\text{инв},q} = (L_1 + L_2)\frac{dI_{2,q}}{dt} + \omega(L_1 + L_2)I_{2,d} + U_{\text{тарм},q} + U_{L1,\text{конд},q} \quad (10)$$

Бу ерда, $U_{\text{инв},q}$, $U_{\text{тарм},q}$ - инвертор ва тармоқ кучланишининг реактив ташкил этувчилари.

$I_{2,q}$ - тармоқ токининг реактив ташкил этувчиси.

$I_{2,d}$ - тармоқ токининг актив ташкил этувчиси (айнан мана шу элемент q - ўқида халақитни юзага келтиради).

Тармоққа энергияни беришда динамик бузилишларни аниқлаш: Тармоққа берилиши керак бўлган ток билан ҳақиқий ток ўртасидаги фарқ бошқарув тизимига узатилади:

$$e(t) = I_{\text{ном},dq}(t) - I_{2,dq}(t) \quad (11)$$

Бу ерда, $e(t)$ - бошқарув тизимидаги жорий хатолик сигнали.

$I_{\text{ном},dq}(t)$ - тармоққа узатилиши талаб қилинган (номинал) ток вектори

Такомиллаштириладиган курилмадаги PI-регулятор тенгламаси Мана шу хатоликни нолга тушириш ($\frac{dI_2}{dt} \to 0$ га интилиш) учун Пропорционал-Интеграл алгоритм ёзилади:

ISSN 3030-3907

$$U_{PI}(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t)dt \quad (12)$$

Бу ерда, $U_{PI}(t)$ - PI-регулятор ишлаб чиқарган дастлабки бошқарувчи кучланиш.

K_p – пропорционал кучайтириш коэффициенти (тезкорлик учун).

K_i - интеграл кучайтириш коэффициенти (статик хатоликни йўқотиш учун).

Ўзаро таъсирни узиш: (9) ва (10) формулалардаги зарарли параметрларни йўқ қилиш учун бошқарув тизимига махсус тескари кучланишлар (компенсация) қўшилади:

$$\Delta U_{LC\ ,d} = -\omega(L_1 + L_2)I_q,$$
$$\Delta U_{LCL,q} = \omega(L_1 + L_2)I_d \quad (13)$$

Бу ерда, $\Delta U_{LCL,d}$, $\Delta U_{LCL,q}$ - d ва q ўқлари бўйича фазаларнинг бир-бирига халақит беришини йўқ қилувчи (инкор этувчи) тескари компенсация кучланишлари.

Резонансни актив сўндириш: LCL-фильтрнинг табиатидан келиб чиқадиган чексиз тебранишни (резонансни) пассив резисторсиз, дастурий тарзда бўғиш учун, конденсатор токи ($I_{\text{конд}}$) виртуал қаршиликка (K_d) кўпайтирилиб, тизимга тескари зарба (минус ишораси билан) берилади:

$$U_{\text{резонс}}(t) = -K_d \cdot I_{\text{конд}}(t) \quad (14)$$

Бу ерда, $U_{\text{резонс}}(t)$ - LCL-фильтрдаги резонансни математик бўғиш учун тизимга уриладиган тескари кучланиш.

K_d - виртуал қаршилик коэффициенти

$I_{\text{конд}}(t)$ - конденсаторнинг ҳақиқий (ўлчанган) токи.

Умумлашган якуний такомиллаштирилган модель: тармоқ билан синхронизация ($U_{\text{тарм}}$), хатоликни йўқотиш (PI-регулятор, (12)), фазаларни мустақил қилиш (13) ва резонансни математик сўндириш (14) жараёнларининг барчасини ягона математик тизимга бирлаштирамиз:

$$U_{\text{инв,АБС}} = U_{\text{тарм,АБС}}(t) + (K_d \cdot e(t) + K_i \int e(t)dt) + \Delta U_{LCL} - K_d \cdot I_{\text{конд}}(t) \quad (15)$$

МУҲОКАМА ВА НАТИЖАЛАР

Энг кичик квадратлар усули ёрдамида математик моделнинг адекватлигини ва тажриба натижаларига қанчалик мос келишини текширамиз. Моделни синовдан ўтказишда энг кичик квадратлар усулининг моҳияти шундан иборатки, у симуляцияда (ёки тажрибада) олинган реал натижалар билан сизнинг математик формулангиз ҳисоблаб берган назарий натижалар ўртасидаги фарқларнинг (хатоликларнинг) квадратлари йиғиндисини минималлаштиради.

Энг кичик квадратлар усули орқали математик моделни синовдан ўтказиш босқичлари:

ISSN 3030-3907

1-босқич: Мақсад функциясини (Квадратлар йиғиндисини) тузиш.

Текширив вақтида n та нуқтада (масалан, ҳар 0.001 секундда) тармоқ токи ўлчанади. Текширивдаги ҳақиқий токни $I_{ном}(t_i)$, яратилган модель (15) асосида ҳисобланган назарий токни эса $I_{наз}(t_i)$, деб қабул қилинади.

Энг кичик квадратлар усулининг бош шарти - бу икки қиймат ўртасидаги хатоликлар квадрати йиғиндиси (S) минимумга интилиши керак:

$$S = \sum_{i=1}^{n}\left(I_{ном}(t_i) - I_{наз}(t_i)\right)^2 \to min \qquad (16)$$

2-босқич: Адекватлик дисперсиясини ҳисоблаш: яратилган моделнинг реал жараёндан ўртача қанчалик четга чиқишини баҳолаш учун қолдиқ дисперсия ($S^2_{қол}$) топилади. Бу ерда n - текширивлар (нуқталар) сони, m - математик моделдаги номаълум коэффициентлар сони (масалан, Kp, Ki, Kd учун m=3).

$$S^2_{қол} = \frac{S}{n-m} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(I_{ном}(t_i) - I_{наз}(t_i)\right)^2}{n-m} \qquad (17)$$

3-босқич: Текширивнинг ўз дисперсиясини ҳисоблаш. Реал текширивнинг (ёки симуляциянинг) ўзида ҳам шовқинлар бўлади. Сигналнинг ўртача қийматини $I_{ўрт}$ деб, текширив хатолиги дисперсияси қуйидагича аниқланади:

$$S^2_{ўрт} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(I_{ном}(t_i) - I_{ўрт}\right)^2}{n-1} \qquad (18)$$

Фишер (Fisher) мезони бўйича. Энг кичик квадратлар усулининг мантиқий якуни - бу Фишер мезонидир (F). У назарий моделнинг хатолиги текширивнингнинг ўз хатолигидан катта эмаслигини исботлайди. Ҳисобланган Фишер коэффициенти қуйидагича топилади:

$$F_{тек} = \frac{S^2_{қол}}{S^2_{ўрт}} \qquad (19)$$

Ишлаб чиқилган dq фазосидаги актив филтрли (LCL) моделларининг текширив натижаларига мослигини синовдан ўтказиш учун энг кичик квадратлар усули қўлланилди. Текширив ва назарий ток қийматлари ўртасидаги қолдиқ дисперсия ($S^2_{қол}$) баҳоланди ва Фишер (Fisher) мезони ҳисоблаб чиқилди. Текширув натижасида ҳисобланган Фишер коэффициенти жадвал қийматидан кичиклиги ($F_{тек} < F_{жад}$) аниқланди. Бу эса ишлаб чиқилган математик моделнинг 95% ишончлилик даражасида ($\alpha=0.05$) мутлақо адекват эканлигини ва реал инвертор тизимларида энергия сифатини ошириш учун хизмат қилишини математик жиҳатдан қатъий асос ҳисобланади.

ISSN 3030-3907

ФОЙДАЛИ АДАБИЕТЛАР РЎЙХАТИ

1. Ibragimova X.I., Baranova M.P. Прогнозируемые энергетические характеристики фотоэлектрических преобразователей в автономных системах электроснабжения при помощи инверторного блока. (2024), Journal of Advances in Engineering Technology Vol.1(13), 2024 January-March, 2024.
2. Blaabjerg, F., Teodorescu, R., Liserre, M., Timbus, A. V. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2006. Vol. 53, No. 5. P. 1398–1409. DOI: 10.1109/TIE.2006.881997.
3. Teodorescu, R., Liserre, M., Rodriguez, P. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. John Wiley & Sons, 2011. DOI: 10.1002/9780470667057.
4. Liserre, M., Blaabjerg, F., Hansen, S. Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier // IEEE Transactions on Industry Applications. 2005. Vol. 41, No. 5. P. 1281–1291. DOI: 10.1109/TIA.2005.853373.
5. Beres, R. N., Wang, X., Blaabjerg, F., Bak, C. L., Liserre, M. A Review of Passive Filters for Grid-Connected Voltage Source Converters // 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 2014. DOI: 10.1109/APEC.2014.6803611.
6. Dannehl, J., Liserre, M., Fuchs, F. W. Filter-Based Active Damping of Voltage Source Converters With LCL Filter // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011. Vol. 58, No. 8. P. 3623–3633. DOI: 10.1109/TIE.2010.2081952.
7. Peña-Alzola, R., Liserre, M., Blaabjerg, F., Ordonez, M., Yang, Y. LCL-Filter Design for Robust Active Damping in Grid-Connected Converters // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2014. Vol. 10, No. 4. P. 2192–2203. DOI: 10.1109/TII.2014.2361604.
8. Yao, W., Yang, Y., Zhang, X., Blaabjerg, F., Loh, P. C. Design and Analysis of Robust Active Damping for LCL Filters Using Digital Notch Filters // IEEE Transactions on Power Electronics. 2017. Vol. 32, No. 3. P. 2360–2375. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2565598.
9. Ben Said-Romdhane, M., Naouar, M. W., Slama-Belkhodja, I., Monmasson, E. Robust Active Damping Methods for LCL Filter-Based Grid-Connected Converters // IEEE Transactions on Power Electronics. 2017. Vol. 32, No. 9. P. 6739–6750. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2626290.
10. Xu, J., Xie, S. LCL-Resonance Damping Strategies for Grid-Connected Inverters with LCL Filters: A Comprehensive Review // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2018. Vol. 6. P. 292–305. DOI: 10.1007/s40565-017-0319-7.

ISSN 3030-3907

11. Bahrani, B., Karimi, A., Rey, B., Rufer, A. Decoupled dq-Current Control of Grid-Tied Voltage Source Converters Using Nonparametric Models // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. Vol. 60, No. 4. P. 1356–1366. DOI: 10.1109/TIE.2012.2185017.
12. Zhou, S., Liu, J., Zhou, L., Zhang, Y. DQ Current Control of Voltage Source Converters with a Decoupling Method Based on Preprocessed Reference Current Feed-forward // IEEE Transactions on Power Electronics. 2017. Vol. 32, No. 11. P. 8904–8921. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2651139.
13. Ghasemi, M. A., Zarei, S. F., Peyghami, S., Blaabjerg, F. A Theoretical Concept of Decoupled Current Control Scheme for Grid-Connected Inverter with L-C-L Filter // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Art. 6256. DOI: 10.3390/app11146256.
14. Yoon, S.-J., Lai, N. B., Kim, K.-H. A Systematic Controller Design for a Grid-Connected Inverter with LCL Filter Using a Discrete-Time Integral State Feedback Control and State Observer // Energies. 2018. Vol. 11, No. 2. Art. 437. DOI: 10.3390/en11020437.
15. Zhu, D., Zou, X., Zhao, Y., Peng, T., Zhou, S., Kang, Y. Systematic Controller Design for Digitally Controlled LCL-Type Grid-Connected Inverter with Grid-Current-Feedback Active Damping // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. Vol. 110. P. 642–652.
16. Wang, X., Blaabjerg, F., Loh, P. C. Grid-Current-Feedback Active Damping for LCL Resonance in Grid-Connected Voltage-Source Converters // IEEE Transactions on Power Electronics. 2016. Vol. 31, No. 1. P. 213–223. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2411851.
17. Wang, X., Blaabjerg, F., Loh, P. C. Virtual RC Damping of LCL-Filtered Voltage Source Converters with Extended Selective Harmonic Compensation // IEEE Transactions on Power Electronics. 2015. Vol. 30, No. 9. P. 4726–4737. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2361853

ISSN 3030-3907