АҢДАТПА

«Smart Grid желілеріндегі телетрафик сипаттамаларының блокчейн технологияларына әсерін зерттеу»
тақырыбындағы диссертациялық жұмыс

8D06201 «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» мамандығы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алуға ұсынылған

КОНЫРОВА МАДИНА ЖАНАТОВНА

Жұмыстың өзектілігі: Smart Grid жүйелерінің дамуы энергожүйедегі дербес деректер алмасу түйіні болып табылатын үлестірілген генерация объектілері мен просьюмерлер санының артуымен қатар жүреді. Бұл жағдай ақпараттық коммуникациялық инфрақұрылымға қойылатын талаптарды өзгертеді. Дәстүрлі электр желілеріне тән орталықтандырылған және болжамды ақпараттық ағындар құрылымы орнына есептеу приборлары, инверторлар, жаңартылатын энергия көздерінің контроллерлері, жинақтау жүйелері мен просьюмер агенттері арасында үздіксіз, минималды кідіріспен және қажетті қорғаныс деңгейімен жүзеге асырылуы тиіс үлестірілген архитектура келеді.

Smart Grid — ақпарат алмасуды, цифрлық басқару құралдарын, датчиктер мен атқарушы құрылғыларды пайдалану арқылы жүйеге қатысушылардың өзара үйлесімді жұмысын қамтамасыз ететін және электрмен жабдықтаудың сенімділігін арттыратын интеллектуалды электр энергетикалық жүйе.

Үлестірілген түйіндер санының артуы желінің жұмыс режимдерінің анықталмағандығын арттырады және энергия нарығы қатысушыларының өзара әрекеттесу тетіктерін жасау қажеттілігін туындатады, олар децентрализацияланған деректер мен энергия алмасу қағидаттарына бағытталған. Осындай тетіктерді, соның ішінде тең дәрежелі электр энергиясы саудасы мен үлестірілген тізілім технологияларына негізделген платформаларды іске асыру деректерді беру хаттамаларының масштабталуы мен интероперабельдігі, сондай ақ нақты уақыт режимінде телеметриялық ақпаратты синхрондау мәселелерін шешуді талап етеді.

Smart Grid архитектурасы мен энергетикалық жүйелердің киберқауіпсіздігі мәселелеріне арналған зерттеулердің едәуір көлеміне қарамастан, коммуникациялық инфрақұрылымның масштабталу талаптары мен оның жекелеген сегменттеріне бағытталған мақсатты шабуылдарға төзімділікті бір мезгілде ескеретін үлестірілген просьюмерлердің ақпараттық өзара әрекеттесуінің кешенді модельдерін құру мәселелері жеткіліксіз зерттелген күйінде қалып отыр. Атап айтқанда, Smart Grid түрлі құрылғылары арасындағы деректер алмасу хаттамаларының ерекшелігін ескере отырып, үлестірілген коммуникациялық архитектуралардың қорғалу деңгейін бағалау әдістері, сондай ақ энергияны децентрализацияланған саудалауға арналған

ақаусыздыққа төзімді ақпараттық платформаларды жобалау тәсілдері одан әрі дамытуды талап етеді.

Зерттеудің мақсаты: Телетрафик теориясы әдістері мен блокчейн технологияларын Smart Grid жүйесінде қолданудың тиімділігін зерттеу.

Зерттеу объектісі: Smart Grid коммуникациялық инфрақұрылымы.

Зерттеу пәні: Коммуникациялық инфрақұрылымдағы блокчейн технологияларының тиімді жұмыс істеуіне телетрафик сипаттамаларының әсері.

Зерттеу әдістері: Жұмыста бұқаралық қызмет көрсету теориясы, телетрафик теориясы және графтар теориясы әдістері қолданылды. Компьютерлік модельдеу үшін MatPower (MatLab), Visual Studio Code, Ganache бағдарламалық құралдары пайдаланылды.

Зерттеу міндеттері:

1. Кіріс трафигінің қарқындылығының Smart Grid жүйесінің жұмыс көрсеткіштеріне әсерін зерттеу.
2. Желінің графтық моделіне негізделген энергетикалық сұраныстарды маршруттау алгоритмін әзірлеу және іске асыру, сондай-ақ блокчейн инфрақұрылымының смарт-келісімшарттары арқылы транзакцияларды орындау мен верификациялау.
3. Сұраныстарды өңдеу уақыты, деректерді беру кідірісі және желінің өткізу қабілеті сияқты коммуникациялық жүйеге қызмет көрсету сапасының көрсеткіштері бойынша әзірленген модельдің тиімділігін эксперименттік бағалау.

Қорғауға шығарылатын негізгі тұжырымдар:

1. Қуат тапшылығы мен телетрафик қарқындылығын ескере отырып, Smart Grid коммуникациялық жүйесінің жұмыс режимдерін ауыстыру алгоритмі ұсынылды.
2. Smart Grid желісінде шығындарды графтық модель негізінде азайтуға арналған блокчейн платформасындағы смарт келісімшарттар алгоритмі ұсынылды.
3. Телетрафикті басқару алгоритмін маршруттау алгоритмімен және блокчейн арқылы верификациялау тетігімен біріктіретін модель әзірленді. Сондай-ақ оның Smart Grid желілеріндегі тиімділігі бағаланды.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы:

1. Smart Grid өтінімдерін өңдейтін коммуникациялық жүйенің қуат тапшылығы кезінде іске қосылатын авариялық режимнен шамадан тыс жүктеме режиміне ауысуы жүктеме қарқындылығының $A \geq 7$ Эрланг шегімен анықталады. Бұл шек режимдерді ауыстыру алгоритмін әзірлеуге негіз болды.
2. Шығындарды графтық модель негізінде азайтуға арналған смарт-келісімшарттардың блокчейн алгоритмі смарт-келісімшарттардың орындалу кідірісін 0,5 секундтан төмен деңгейде қамтамасыз етеді.
3. Телетрафикті басқару режимдерін ауыстыру алгоритмі мен блокчейндік маршруттау алгоритмін біріктіретін Smart Grid ақпараттық ағындарын басқару моделі базалық модельмен салыстырғанда орындалу

уақытын 20,9 %-ға, ал транзакциялар кідірісін 21 %-ға азайтады. Желінің өткізу қабілеті (TPS) 48,9 %-ға артады.

Автордың жеке үлесі: Диссертацияда келтірілген барлық зерттеу нәтижелері автордың эксперименттік зерттеулерге тікелей қатысуы және эксперимент нәтижелерін өңдеуі арқылы алынды.

Диссертация нәтижелерінің апробациясы: Диссертациялық зерттеудің негізгі нәтижелері ACM халықаралық конференциясында (Алматы, 2021), коммуникациялар, ақпарат, электронды және энергетикалық жүйелер бойынша халықаралық конференцияда CIEES 2022 (Варна, 2022), жаңартылатын энергия көздері бойынша жыл сайынғы халықаралық конгресте (Оксфорд, 2024), жаңартылатын энергия көздерін интеграциялау технологиялары мен қосымшалары бойынша халықаралық конференцияда ICREITA-24 (Рим, 2024) баяндалып, талқыланды.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы: Диссертациялық жұмыстың ғылыми нәтижелері Internet Training Center компаниясының корпоративтік ортасына MatLab және MatPower құралдары негізінде әзірленген, электр энергиясы ағындарын модельдеуге және оңтайландыруға мүмкіндік беретін бағдарламалық шешім түрінде енгізілді. Әзірленген бағдарламалық қамтамасыз ету энергожүйелердің жұмыс режимдерін оңтайландыру әдістерін одан әрі дамыту және жаңартылатын энергия көздерін қолдануды кеңейту үшін қолданбалы негіз ретінде пайдаланылады. Нәтижелердің енгізілгендігі тиісті актімен расталған.

Жарияланымдар: Диссертациялық жұмыстың негізгі нәтижелері 9 ғылыми жарияланымда жарық көрді. Оның ішінде 2 мақала Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің білім және ғылым саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған ғылыми басылымдарда, 3 мақала Scopus дерекқорына енгізілген шетелдік ғылыми журналдарда жарияланды. Бұдан басқа, халықаралық ғылыми практикалық конференцияларда 3 баяндама ұсынылып, олардың материалдары жарияланды. 2024 жылдың 4 қазанында «Блокчейн технологияларын интеллектуалды энергожүйелерге интеграциялау» тақырыбындағы зерттеуге ҚР №50222 авторлық куәлігі алынды.

Диссертацияның көлемі мен құрылымы: Диссертациялық жұмыс кіріспеден, анықтамалардан, қысқартулардан, төрт тараудан, қорытындыдан, пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және қосымшалардан тұрады. Библиографиялық тізім 109 атаудан құралған. Жұмыстың жалпы көлемі 118 бетті құрайды, 34 сурет және 9 кесте қамтылған.

Диссертация телетрафик теориясы, графтық оңтайландыру және блокчейн технологияларын кешенді қолдануға негізделген интеллектуалды желілердегі энергетикалық ағындарды басқару моделін әзірлеуге арналған. Осы негізде әзірленген басқару моделі бар тәсілдермен тиімділігі, орнықтылығы және масштабталуы өлшемдері бойынша салыстырылды.

Бірінші тарау Қазақстанның энергетикалық секторын талдауға арналған. Елдегі жаңартылатын энергия көздері мен Smart Grid технологияларының даму үрдістері анықталды. Жеке бөлек төмен көміртекті

даму стратегиялары және оларда күн мен жел генерациясының алатын орны қарастырылды.

Сонымен қатар жаңартылатын энергетикаға бірқатар шектеулер тән. Олардың негізгісі ауа райы жағдайлары мен тәулік уақытына тәуелділікпен байланысты генерацияның тұрақсыздығы болып табылады, бұл жүктеменің шыңдалу кезеңдерінде желінің жұмыс режимінің орнықтылығын сақтау үшін энергия жинақтау жүйелерін қолдануды талап етеді. Мемлекеттік реттеу, инвестициялық қолдау және энергия тиімді технологияларды енгізу мәселелеріне жеке назар аударылды. Интеллектуалды энергетикалық жүйелерді құрудың заманауи технологиялық тәсілдеріне, соның ішінде бұқаралық қызмет көрсету теориясы, графтар теориясы, заттар интернеті технологиялары мен блокчейн әдістеріне талдау жасалды. Қолданыстағы тәсілдердің артықшылықтары мен шектеулері анықталды, олардың ғылыми техникалық мәселелері айқындалды және интеллектуалды желілерді басқарудың кешенді тәсілін әзірлеу қажеттілігі негізделді.

Екінші тарауда телетрафик теориясы, графтар теориясы және үлестірілген цифрлық технологиялар әдістерін интеграциялауға негізделген интеллектуалды жүйелерді модельдеудің теориялық және технологиялық негіздері қарастырылды. Апаттық жағдайларда басым басқару процестерін сипаттауға, сондай ақ желінің жұмыс сипаттамаларын, оның ішінде жүктелуі мен шамадан тыс жүктелу ықтималдығын бағалауға арналған бұқаралық қызмет көрсету моделдерін қолдану мүмкіндіктеріне талдау жасалды. Жүйелерді өлшенген бағытталған графтар түрінде құрылымдық көрсету үшін графтар теориясын қолдану қарастырылды. Бұл тәсіл генераторды таңдау кезінде тиімділікті арттыру үшін минималды шығындар өлшемі бойынша оңтайландырылған маршруттарды құру процестерін формализациялауға мүмкіндік беретіні көрсетілді. Энергия нарығы қатысушыларының децентрализацияланған өзара әрекеттесуін ұйымдастыру үшін блокчейн технологияларын қолдану мүмкіндіктері зерттелді. Смарт келісімшарттар мен үлестірілген тізілімдерді қолдану есептесулердің ашықтығын, автоматтандырылуын және энергетикалық ресурстарды алмасудың сенімділігін арттыруды қамтамасыз ететіні атап өтілді. Жалпы алғанда екінші тарауда тиімділікті, орнықтылықты және жұмыс сенімділігін арттыруға бағытталған жаңа буын интеллектуалды жүйелерін құру үшін көрсетілген әдістерді кешенді қолданудың орындылығы негізделді.

Үшінші тарауда әртүрлі трафик түрлерін өңдеудің дифференциациясын және маңызды сұраныстарды қызмет көрсету сапасын арттыруды қамтамасыз ететін екі деңгейлі басымдылық жүйесі бар телетрафик теориясының математикалық моделдері зерттелді. Сондай ақ желідегі қуат ағындарын, кернеу деңгейлерін және шығындарды есептеуді қамтамасыз ететін MatLab ортасы мен MatPower пакетін пайдалана отырып, электрэнергетикалық жүйенің орнықты режимінің моделдері зерттелді. Модельдеу нәтижелері негізінде түйіндер шиналарға, ал қырлар белсенді қуат шығындарымен анықталатын салмақтары бар электр беру желілеріне сәйкес келетін энергожүйенің графтық көрінісі ұсынылды. Энергияны беру

маршруттарын оңтайландыру үшін генераторлар мен тұтынушылар арасындағы қуат шығындарының қосындысы минималды болатын жолдарды анықтауға мүмкіндік беретін Дейкстра алгоритмі қолданылды. Блокчейн верификация тетігі жеке қарастырылды. Ол таңдалған маршруттарды бекітеді және оларды криптографиялық хеш функциялар мен смарт контрактілер көмегімен тексереді. Бұл маршрут таңдалғаннан кейін оның деректерін алмастыру мүмкіндігін болдырмайды.

Нәтижесінде тарау орнықты режимдерді есептеу, телетрафик теориясы, графтар теориясы және блокчейн болатын төрт түрлі тәсілді интеллектуалды жүйенің ағын үлестірімін оңтайландырудың бір моделіне біріктіреді.

Төртінші тарауда ұсынылған блокчейн архитектурасы тәжірибе жүзінде тексерілді. Эксперименттер PoA (Ganache/Truffle) негізіндегі Ethereum тестілік ортасында жүргізілді. Операцияларды орындау уақыты, транзакцияларды өңдеу кідірісі, өткізу қабілеті және есептеу ресурстарын жұмсау болатын төрт көрсеткіш бағаланды. Нәтижелер қосымша статистикалық валидациядан өтті, ал жеке жүктеме артқан кезде жүйенің қалай әрекет ететіні, яғни масштабтылық мәселесі тексерілді.

Қорытындыда диссертациялық зерттеудің негізгі нәтижелері жинақталды. Графтар теориясы, телетрафик және блокчейн технологиялары әдістерін интеграциялау интеллектуалды энергия желілеріндегі энергетикалық ағындарды басқарудың тиімді архитектурасын құруға мүмкіндік беретіні көрсетілді. Әзірленген жүйе интеллектуалды желіде басқаруды оңтайландыруды, энергетикалық транзакциялардың ашықтығын арттыруды және энергия алмасу процестерін автоматтандыруды қамтамасыз етеді. Рұқсат етілген блокчейн желісінде смарт контрактілерді қолдану операциялардың сенімділігін, өзгермейтіндігін және аудитке жарамдылығын қамтамасыз етеді. Алынған нәтижелер децентрализацияланған жүйелерді дамыту және интеллектуалды инфрақұрылымды басқару тиімділігін арттыру үшін ұсынылған тәсілді қолданудың перспективалылығын растайды.

Осы диссертация негізінде келесі қорытындылар тұжырымдалды:

1. Кіріс трафигінің қарқындылығының Smart Grid коммуникациялық жүйесінің жұмысына әсері зерттелді. Қуат тапшылығы кезінде жүйенің авариялық режимге ауысатыны анықталды. Жүктеме қарқындылығы $A \geq 7$ Эрланг болғанда жүйе шамадан тыс жүктеме режиміне өтеді, бұл режимде өтінімдерге қызмет көрсетуді күту уақыты күрт артады. Осы заңдылық негізінде жұмыс режимдерін ауыстыру алгоритмі әзірленді.

2. Энергетикалық сұраныстарды маршруттауға арналған смарт-келісімшарттардың блокчейн алгоритмі әзірленіп, іске асырылды. Ең аз шығынды маршрут желінің графтық моделі арқылы анықталады, ал транзакциялар смарт-келісімшарттар арқылы орындалып, верификацияланады. Смарт-келісімшарттардың орындалу кідірісі 0,5 секундтан аспайды.

3. Smart Grid ақпараттық ағындарын басқару моделінің тиімділігіне эксперименттік бағалау жүргізілді. Базалық модельмен салыстырғанда сұраныстарды өңдеу уақыты 20,9 %-ға, транзакциялар кідірісі 21 %-ға

қысқарды, ал өткізу қабілеті (TPS) 48,9 %-ға артты. Бұл нәтижелер жүйенің масштабталуы мен өнімділігінің артқанын растайды.

Қосымшаларда зерттеу нәтижелері бойынша негізгі деректер жинақталған

1. Смарт контракт коды
2. Авторлық құқық