

АНДАТПА

«6D071800 – Электр энергетикасы» мамандығы бойынша
философия ғылымдарының докторы (PhD) дәрежесіне ұсынылған
диссертация

МҰРАТ АЙБЕК ҚАЙРАТҰЛЫ

«Тұрақты токпен үстеме магниттеуі бар трансформатор типті
басқарылатын реакторларды өңдеу және зерттеу»

Зерттеудің өзектілігі.

Реактивті қуат пен кернеуді реттеудің бақыланатын құралдарынсыз электр қуаты жүйесінің қалыпты жұмыс режимдерін және электр қуаты сапасының нормативтерін қамтамасыз ету мүмкін емес. Қосалқы станция шиналарындағы кернеудің оңтайлы деңгейін сақтау электр желілеріндегі белсенді қуаттың ысырабын барынша азайтады және электр желілерінің тиімділігін арттырады. FACTS құрылғылары энергия берудің жаңа буынының ажырамас элементтері болып табылады.

Реактивті қуатты реттеуді орындайтын FACTS құрылғыларының бірі шунттаушы реактор (ШР) болып табылады. Артық реактивті қуатты шектеу мәселесі ұзын желіаралық желілерде де, жоғары вольтты қалалық электр желілерінде де өткір тұр. Кабельді желілердің зарядтаушы қуаты воздушный желілерге қарағанда бірнеше есе жоғары. Мысалы, 110 кВ кабельді желінің зарядтаушы қуаты 100 км-ге 8,4–18,0 МВАр, ал воздушный желі үшін — 3,4–4,0 МВАр.

«Алатау Жарық Компаниясы» АҚ электр желісінің мысалы — Алматы мен Алматы облысының ең ірі өңірлік электр желі компаниясы. Оның құрамында қаланың сақина желісін қалыптастыратын 220 кВ кабельді желілердің 47,45 км және 110 кВ кабельді желілердің 206,36 км бар. 220 кВ кабельді желілерінің жалпы зарядтаушы қуаты кабель түріне байланысты 50–240 МВАр шамасында — жүктемесі аз мерзімдерде рұқсат етілмейтін кернеу асып кетуін болдырмау үшін үздіксіз басқарылатын компенсацияны қажет ететін шама.

Қазақстан Республикасының 35–500 кВ электр желілерінде реактивті қуатты реттеу құралдарына сұраныс айтарлықтай жоғары болғанымен, олардың өндірісі ел кәсіпорындарында іске асырылмаған. Жеткізілімдер Ресей Федерациясы, Испания, Италия, Украина және басқа елдерден жүзеге асырылады. «Ішкі ел құндылығын және экспортқа бағдарланған өндірістерді дамыту бағдарламасына» сәйкес басқарылатын шунттаушы реакторлар өндірісін жолға қою қажет.

Тұрақты токпен басқарылатын трансформаторлық типтегі үш өзекті реактор тұжырымдамасы принципіалды тұрғыдан жаңа емес. 1980-жылдары КСРО-да тұңғыш рет екі осындай реактор БАМ-ның «Таксимо» қосалқы станциясында пайдалануға берілді. Реакторлар Ташкенттегі Чирчик трансформатор зауытының 6,3 МВА, 35 кВ трансформаторлары негізінде

жасалды. Алайда бұл реакторлардың басты кемшілігі тор орамасы тогының жоғарғы гармоникалық құрамаларының жоғары деңгейі болды — жартылай кезеңдік қанығу режимінің болмауы салдарынан. Осы кемшілік тор орамасы секцияларын қарсы-параллель қосу және компенсациялық орамды үшбұрышпен қосу арқылы жойылады.

Жартылай кезеңдік қанығу режимі бар үш өзекті БШР өндірісін игеру бірқатар шешілмеген ғылыми мәселелерді шешуді талап етеді. Тор орамасы тогының гармоникалық бұрмалану коэффициентінің магнит жүргізгіш геометриялық параметрлеріне тәуелділіктері ғылыми әдебиеттерде белгіленбеген; материалдардың ең аз құнының критерийі бойынша конструкцияны оңтайландыру әдістері жасалмаған; үш өзекті және төрт өзекті конструкциялардың бір типті электромагниттік сипаттамалармен сандық салыстырылуы орындалмаған.

Осылайша, осы диссертациялық жұмыстың өзектілігі тогтің жоғарғы гармоникалық құрамаларының ең аз деңгейімен жартылай кезеңдік қанығу режимін қамтамасыз ететін магнит жүргізгіш конструктивтік параметрлерімен үш өзекті БШР электромагниттік сипаттамаларының өзара байланысын анықтау және отандық өндіріс ұйымдастырудың ғылыми негізі ретінде белсенді материалдардың ең аз құны критерийі бойынша конструкцияны оңтайландыру әдісін жасау қажеттілігімен анықталады.

Практикалық маңыздылығы.

Жұмыс нәтижелері «Asia Trafo» АҚ және «Кентау трансформатор зауыты» АҚ кәсіпорындарында 110 кВ, 25 МВАр БШР тәжірибелік-өнеркәсіптік үлгісін дайындауға техникалық құжаттама жасаудың ғылыми негізін қамтамасыз етеді. Белгіленген заңдылықтар магнит жүргізгіш геометриялық параметрлерін өзгерту кезінде реактордың номиналды режимінің ауысуын итерациялық есептеулерсіз бағалауға мүмкіндік береді. Нәтижелерді тұтынушылар: «KEGOC» АҚ, «АЖК» АҚ және Қазақстан Республикасының өңірлік электр желі компаниялары.

Диссертациялық зерттеудің мақсаты.

Тор орамасы тогының жоғарғы гармоникалық құрамаларының ең аз деңгейімен жартылай кезеңдік қанығу режимін қамтамасыз ететін магнит жүргізгіштің конструктивтік және режимдік параметрлерінің өзара байланысын анықтауға негізделген оңтайлы конструктивтік параметрлері бар үш өзекті басқарылатын шунттаушы реакторды жасау арқылы жоғары және өте жоғары кернеулі электр желілерінде реактивті қуатты компенсациялаудың тиімділігін арттыру.

Ғылыми міндеттері:

– Реактивті қуатты компенсациялаудың қолданыстағы әдістерін, БШР конструкцияларын және осы салада заманауи зерттеулерді талдау; шешілмеген ғылыми мәселелерді тұжырымдау.

– Үш өзекті БШР физикалық моделін жасап, тұрақты токпен магниттеудің әртүрлі режимдерінде оның электромагниттік сипаттамаларын тәжірибелік зерттеу.

– Matlab Simulink бағдарламалық кешенінде үш өзекті БШР верификацияланған имитациялық моделін жасау; модельдің физикалық тәжірибемен сәйкестік дәрежесін анықтау.

– Магнит жүргізгіш конструктивтік параметрлерінің (S қимасы мен L_s ұзындығы) тор орамасы тогына және гармоникалық бұрмалану коэффициентіне әсерін зерттеу; олардың ықпалының заңдылықтарын белгілеу.

– Номиналды режимді қамтамасыз ету кезінде белсенді материалдардың ең аз құны критерийі бойынша үш өзекті БШР конструктивтік параметрлерін оңтайландыру әдістемесін жасау және 110 кВ, 25 МВАр реактор мысалында верификациялау.

– Үш өзекті конструкцияны оңтайландыру нәтижелері негізінде электромагниттік сипаттамалар бойынша балама төрт өзекті конструкцияны анықтап, олардың сандық техникалық-экономикалық салыстырылуын орындау.

– 110 кВ БШР динамикалық режимдерін зерттеу және реактор конструкциясын өзгертпей жылдамдықты арттыру әдісін анықтау.

Зерттеу әдістері.

Жұмыста теориялық электротехника әдістері; физикалық және имитациялық модельдеу; гармоникалық талдау; есептеу тәжірибесін жоспарлау; Gaussian Process регрессиясына негізделген суррогаттық модельдеу; Expected Improvement критерийімен Байестік оңтайландыру; техникалық-экономикалық талдау әдістері қолданылды.

Диссертациялық жұмыстың ғылыми жаңалығы:

1. Үш өзекті БШР тор орамасы тогының ең аз гармоникалық бұрмалану коэффициентінің магнит жүргізгіш геометриялық параметрлеріне тәуелсіздігі алғаш рет анықталды: $S \in [0,12; 0,16]$ м² және $L_s \in [2,325; 2,800]$ м диапазонында барлық конструкциялар үшін $THD_{min} = 0,17-0,33\%$. Геометрия тек ток осіндегі жұмыс нүктесінің орнын анықтайды, бірақ осы нүктедегі ток сапасын емес.

2. Жұмыс өзегінің қимасы S -ке тор орамасының оңтайлы тогының сезімталдық коэффициенті 0,1 А/см², өзек ұзындығына тәуелсіз ($R^2 = 0,990-0,999$) сызықтық тәуелділігі белгіленді. S пен L_s ықпалдарының аддитивті тәуелсіздігі магнит жүргізгіш геометриясы өзгерген кезде номиналды режимнің ауысуын қосымша симуляцияларсыз бағалауға мүмкіндік береді.

3. Үш өзекті БШР конструктивтік параметрлерін екі кезеңде оңтайландыру әдістемесі жасалды: параболамен жуықтаумен бірдей тор бойынша толық іріктеу және Gaussian Process суррогаттық моделімен ($R^2=1,0$, Matern52 өзегі) Байестік оңтайландыру. Әдіс оңтайлы конструкцияны анықтады: $S^*=0,155$ м², $L_s^*=2,325$ м, белсенді материалдар құны \$106 648.

4. Компенсациялық орамның шекті кернеуі $U_{ко_шек} \approx 25$ кВ белгіленді, одан асқан жағдайда орам орамдарының санын одан әрі арттыру THD_{min} -ді төмендетпейді. Заңдылық магнит жүргізгіш геометриясына тәуелсіз.

5. Дәлелденген THD_{min} инвариантты негізінде бірдей электромагниттік сипаттамалармен үш өзекті және төрт өзекті броньды БШР конструкцияларының алғаш рет сандық салыстырылуы орындалды. Үш өзекті конструкция белсенді материалдарға шығынды 26,4%-ға азайтатыны көрсетілді (басты фактор: тор орамасының орташа иірімжіп радиусы 435 мм, төрт өзекті конструкцияда 667 мм-ге қарсы).

Алынған нәтижелердің дұрыстығы мынамен расталады:

1. Қазақстан Республикасы МСИ тізіліміне енгізілген тексерілген өлшеу құралдарын пайдалана отырып үш өзекті БШР физикалық модельдерінде жүргізілген тәжірибелік зерттеулермен.

2. Физикалық және имитациялық модельдеу нәтижелерінің орташа абсолюттік пайыздық қате (MAPE) критерийі бойынша жинақталуымен: тор орамасы тогы бойынша 5,0%-дан аспайды және гармоникалық бұрмалану коэффициенті бойынша 2,5% — сызықты емес ферромагниттік құрылғылар үшін жол берілетін қателіктерге сәйкес.

3. Табылған оңтайлы конструкцияның жаһандық сипатын растаумен оңтайландырудың математикалық негізделген әдістерін (Gaussian Process, Bayesian Optimization) қолданумен.

4. Негізгі нәтижелерді рецензияланатын басылымдарда, оның ішінде «Electric Power Systems Research» журналында жариялаумен (Scopus, 78 пайыздық).

Қорғауға мынадай ережелер ұсынылады:

1. Тұрақты токпен магниттеуі бар үш өзекті БШР физикалық модельдері және олардың электромагниттік сипаттамаларын тәжірибелік зерттеу нәтижелері.

2. Matlab Simulink-тегі үш өзекті БШР верификацияланған имитациялық моделі (MAPE 5,0%/2,5%) және тұрақты токпен магниттеу режимдерін модельдеу әдістемесі.

3. Магнит жүргізгіш конструктивтік параметрлерінің БШР электромагниттік сипаттамаларына әсерінің заңдылықтары: THD_{min} геометрияға тәуелсіздігі және S-ке I_{co_opt} сызықтық тәуелділігі (0,1 A/cm² коэффициентімен).

4. GP және Байестік оңтайландыруға негізделген БШР конструктивтік параметрлерін екі кезеңде оңтайландыру әдістемесі. Оңтайлы конструкция: S*=0,155 м², Ls*=2,325 м, THD=0,284%, белсенді материалдар құны \$106 648.

5. Бірдей электромагниттік сипаттамалардағы үш өзекті және төрт өзекті БШР конструкцияларының сандық салыстырылу нәтижелері: үш өзекті конструкцияның белсенді материалдар құны бойынша 26,4%-дық артықшылығы.

6. Реактор конструкциясын өзгертпей тор орамасы тізбегіне оңтайлы белсенді кедергі R* қосу арқылы 110 кВ БШР жылдамдығын арттыру әдісі.

Жарияланымдары.

Диссертацияның негізгі нәтижелері 5 ғылыми жарияланымда көрініс табады: КОКСОН тізімінен отандық басылымдарда 3 мақала; Scopus базасында жариялаулармен халықаралық конференцияда 1 баяндама; «Electric Power Systems Research» журналында 1 мақала (Scopus, 78 пайыздық). Соавтор ретінде нәтижелер шунттаушы реакторлар конструкцияларына Қазақстан Республикасының 2 пайдалы моделіне патентте тіркелді.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі.

Диссертациялық жұмыс кіріспеден, 6 негізгі тараудан, қорытындыдан, пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және қосымшалардан тұрады.

1-тарауда шунттаушы реакторлар конструкцияларын, оның ішінде үш өзекті реакторлардың қолданылу тарихын талдау және заманауи зерттеулерге шолу берілген. Шешілмеген ғылыми мәселелер тұжырымдалған.

2-тарауда жартылай кезеңдік қанығу режимі бар үш өзекті БШР физикалық моделі, тәжірибелік стенд және магниттеудің әртүрлі режимдеріндегі электромагниттік сипаттамаларды зерттеу нәтижелері сипатталған.

3-тарауда Matlab Simulink-те имитациялық модельді жасау әдістемесі, физикалық тәжірибе деректерімен верификация (МАРЕ 5,0% және 2,5%), сондай-ақ БШР динамикалық режимдерін және жылдамдығын зерттеу берілген.

4-тарауда 110 кВ БШР параметрлік талдауының нәтижелері берілген: өзек қимасы мен ұзындығының ықпалының заңдылықтары, THD_{min} геометрияға тәуелсіздігі, компенсациялық орам кернеуінің шекті мәні.

5-тарауда оңтайлы 110 кВ, 25 МВАр БШР орамаларының конструктивтік параметрлерін есептеу берілген. Тараудың нәтижелері 6-тараудың оңтайландыру есебіне арналған белсенді материалдар құны моделінің негізі болып табылады.

6-тарауда GP және Байестік оңтайландыру әдісімен конструктивтік параметрлерді екі кезеңде оңтайландыру, оңтайлы конструкцияны анықтау ($S^*=0,155 \text{ м}^2$, $L_s^*=2,325 \text{ м}$) және үш өзекті мен төрт өзекті БШР конструкцияларын сандық салыстырылуы берілген.