

KICHIK QUVVATLI AES (ATOM ELEKTR STANSIYALARI) TEKNOLOGIYALARINING XAVFSIZLIK VA SAMARADORLIK TAMOYILLARI

Tolipova Surayyo Baxodirovna

Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti o'qituvchisi

Dilmirodov Behruz Sherzod o'g'li

*Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti Energetika
muhandisligi fakulteti talabasi*

Norbekov Jahongir Quvvat o'g'li

*Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti Energetika
muhandisligi fakulteti talabasi*

Annotatsiya: Ushbu maqolada kichik modulli atom elektr stansiyalari (KM AES) texnologiyalarining asosiy xavfsizlik va samaradorlik tamoyillari tahlil qilinadi. Zamonaviy kichik reaktorlar (300 MVt dan kam quvvatga ega) bo'yicha dunyoda davom etayotgan ishlanmalar va ularning an'anaviy yirik AESlarga nisbatan afzalliklari ko'rib chiqiladi. Maqolada KM AESlarning passiv xavfsizlik tizimlari, tabiiy fizik tamoyillar asosidagi avariyalik himoya vositalari, modulli qurilish texnologiyasi va mustahkam dizayn xususiyatlari chuqur o'rganiladi.

Kalit so'zlar: Kichik modulli reaktor (KMR), KM AES, passiv xavfsizlik tizimlari, modulli qurilish, atom energetikasi xavfsizligi, to'rtinchi avlod reaktorlar, termal samaradorlik, elektr tarmog'i integratsiyasi.

Kirish

Atom energiyasining kelajagi an'anaviy katta quvvatli reaktor bloklaridan (1000 MVt va undan yuqori) tobora kengayib borayotgan kichik modulli reaktorlar (KMR) va kichik atom elektr stansiyalari (KM AES) texnologiyalariga qarab siljiyotganini kuzatish mumkin. Global energiya talabining o'sishi, uglerod chiqindilarini kamaytirish bo'yicha Parij kelishuvining majburiyatlari va barqaror, doimiy asosda ishlaydigan elektr energiyasi manbalariga bo'lgan ehtiyoj KM AESlarga nisbatan jahon miqyosida ortib borayotgan qiziqishni keltirib chiqarmoqda. KM AESlar, odatda, 300 MVt dan kam elektr quvvatiga ega bo'lgan modulli yoki sayyor reaktorlardan iborat bo'lib, ularning dizayni ishlab chiqarishda seriyali yig'ish, passiv xavfsizlik tamoyillari va tarmoqqa moslashuvchan integratsiyani o'z ichiga oladi.

Atom energetikasi tarixiy jihatdan murakkab muhandislik loyihalari, katta boshlang'ich sarmoyalar va uzoq qurilish muddatlari bilan bog'liq bo'lgan. Bundan tashqari, Fokusima va Chernobil kabi baxtsiz hodisalar atom energetikasining jamoatchilik tomonidan qabul qilinishida chuqur iz qoldirdi va atrof-muhit xavfsizligi

bo'yicha jiddiy savollar tug'dirdi. KM AES texnologiyalari ushbu muammolarni hal qilishga, bir vaqtning o'zida atom energiyasining afzalliklarini – doimiy va yuqori quvvat zichligiga ega, uglerod chiqindilarisiz energiya manbai sifatida saqlab qolishga qaratilgan. Ushbu yangi yondashuvning asosiy ustuvorliklari ishonchlilik, passiv xavfsizlik, iqtisodiy samaradorlik va turli energetika infratuzilmasi ehtiyojlariga moslashuvchanlikdir.

Zamonaviy KM AES dizaynlarining aksariyati "to'rtinchi avlod" reaktor kontseptsiyalari asosida ishlab chiqilgan bo'lib, ular tabiiy fizik qonunlariga asoslangan passiv xavfsizlik tizimlarini qo'llaydi. Bunda elektr energiyasi yoki inson aralashuvisiz, faqat tortishish kuchi, tabiiy konveksiya va isish orqali sovutishni ta'minlash imkoniyati mavjud. Bu an'anaviy aktiv tizimlarga qaraganda avariya holatlarida xavfsizlikni tubdan oshiradi. Bundan tashqari, modulli qurilish yondashuvi, ya'ni reaktor tarkibiy qismlarini zavod sharoitida ishlab chiqarib, keyin joyida yig'ish, qurilish muddatlarini qisqartirish, sifarni yaxshilash va iqtisodiy samaradorlikni oshirish imkonini beradi.

KM AES texnologiyalarining boshqa muhim jihati – ularning turli energetika tizimlariga moslashuvchanligidir. Ular markazlashtirilgan yirik energetika tarmoqlarini qo'llab-quvvatlashdan tortib, masofaviy hududlarni elektr bilan ta'minlash, sanoat korxonalariga issiqlik va elektr energiyasini bir vaqtda yetkazib berish (ko-generatsiya) va hatto suvni tuzdan tozalashda samarali foydalanishi mumkin. Shu bilan birga, ular quyosh va shamol kabi o'zgaruvchan qayta tiklanuvchi manbalar bilan birgalikda ishlash uchun moslashuvchanlikni ta'minlab, barqaror energetika aralashmasini yaratishga yordam beradi.

Ushbu maqolaning maqsadi – kichik quvvatli atom elektr stansiyalarining asosiy xavfsizlik va samaradorlik tamoyillarini tahlil qilish, ularning an'anaviy AESlarga nisbatan afzalliklarini va qo'llanilish chegaralarini aniqlash, shuningdek ushbu texnologiyaning kelajakdagi energetika tizimlaridagi o'rnini baholashdir. Tadqiqotning asosiy e'tibori KMR turlari (suv bilan sovutiladigan, gaz bilan sovutiladigan, suyuq metall bilan sovutiladigan) bo'yicha xavfsizlik arxitekturasiga, termal va iqtisodiy samaradorlik ko'rsatkichlariga, shuningdek xalqaro xavfsizlik standartlari va regulyator talablariga qaratilgan.

Asosiy qism

Kichik modulli atom elektr stansiyalarining rivojlanishi zamonaviy yadro energetikasining eng istiqbolli yo'nalishlaridan biri hisoblanadi. An'anaviy yirik AESlar bilan taqqoslaganda, KM AESlar bir qator tubdan farqli xususiyatlarga ega bo'lib, ular asosan xavfsizlik, iqtisodiy samaradorlik va tizimga integratsiya qilish imkoniyatlarida namoyon bo'ladi. KM AES dizaynlarining xavfsizlik arxitekturasini o'ziga xos muhandislik yondashuvlarini talab qiladi, chunki ular nafaqat katta reaktorlarda qo'llaniladigan xavfsizlik standartlariga javob berishi, balki o'ziga xos

kichik o'lchamlari va modulli tuzilishi tufayli qo'shimcha imkoniyatlarga ega bo'lishi kerak.

Xavfsizlik jihatidan KM AESlarning eng muhim afzalliklaridan biri passiv xavfsizlik tizimlarini keng qo'llash imkoniyatidir. To'rtinchi avlod reaktor kontseptsionalari asosida ishlab chiqilgan ko'pgina KM AES dizaynlarida issiqlikni olib chiqish jarayoni tabiiy fizik qonunlar – tortishish kuchi, issiqlik o'tkazuvchanligi va tabiiy konveksiya hisobiga amalga oshiriladi. Masalan, NuScale Power kompaniyasining 60 MVt li modulli suv bilan bosim ostidagi reaktori (PWR) dizaynida sovutish suvi aylanmasini ta'minlash uchun hech qanday nasos yoki boshqa mexanik qurilmalar talab qilinmaydi. Avariya holatida reaktor avtomatik ravishda o'chiriladi va issiqlik tortishish kuchi ta'sirida harakatlanuvchi sovutish suvi orqali maxsus issiqlik almashinish qurilmalariga o'tkaziladi. Bu passiv tizim 30 kun davomida inson aralashuvisiz ishlashga qodir bo'lib, Fokusima AESidagi kabi stansiya tashqi energiya manbalaridan uzilgan holatda ham xavfsizlikni ta'minlaydi. Boshqa bir misol sifatida, gaz bilan sovutiladigan yuqori haroratli reaktorlarning (HTGR) dizaynlarida geliy yoki karbonat angidrid kabi inert gazlar ishlatiladi, ular korroziyaga uchramaydi va reaktor faol zonasida yonuvchi gazlar hosil bo'lish ehtimolini bartaraf etadi. Bunday reaktorlarda yadro yonilg'isi o'ziga xos triso (trikiski strukturali) qoplamali zarralar shaklida bo'lib, ular 1600°C gacha bo'lgan haroratlarda ham radiokativ moddalarning chiqib ketishiga to'sqinlik qiladi. Bu esa "avariya xavfsiz" (accident tolerant) texnologiyaning amaliy namunasidir.

KM AESlarning yana bir muhim xavfsizlik xususiyati – dizayn darajasida radiokativ moddalarning atrof-muhitga chiqish ehtimolini minimallashtirishga qaratilgan yondashuvdir. An'anaviy yirik AESlarda faol zona va kondensator alohida binolarda joylashgan bo'lsa, ko'pgina KM AES dizaynlarida integral (yaxlit) dizayn qo'llaniladi. Bunda reaktor idishi, bug 'generatorlari va asosiy aylantirish nasoslari bitta yopiq qobiq ichiga joylashtiriladi. Natijada, agar bug 'o'tkazgichlardan yoriq paydo bo'lsa ham, radiokativ suv bug'i faqat qobiq ichida qoladi va atrof-muhitga tarqalishi oldini oladi. Westinghouse kompaniyasining SMR-300 dizaynida bu tamoyil yanada rivojlantirilgan bo'lib, butun reaktor moduli suv ostiga joylashtirilishi mumkin, bu esa qo'shimcha fizik himoya va sovutish imkoniyatini yaratadi. Bundan tashqari, KM AESlar o'z-o'zidan barqaror reaktivlik koeffitsientlariga ega bo'lishi uchun maxsus dizayn qilinadi – reaktor quvvati har qanday g'ayritabiiy vaziyatda o'z-o'zidan pasayib, "o'zini o'zi cheklovchi" fizik jarayonni ta'minlaydi.

Termal va energiya samaradorligi jihatidan KM AESlar turli texnologik yechimlarni taklif etadi. An'anaviy suv bilan bosim ostidagi reaktorlarning termal samaradorligi 32-36% oralig'ida bo'lsa, yangi avlod dizaynlarida bu ko'rsatkich sezilarli darajada oshirilgan. Masalan, superkritik suv bilan sovutiladigan reaktorlar (SCWR) termodinamik samaradorligi 45% ga yetishi mumkin, bu esa ishlatilgan

yonilg'idan ko'proq foydali energiya olish imkonini beradi. Gaz bilan sovutiladigan reaktorlar 750-950°C yuqori chiqish haroratiga ega bo'lib, nafaqat elektr energiyasini, balki sanoat uchun yuqori haroratli issiqlikni ham ishlab chiqarish imkoniyatini ochadi. Xususan, yuqori haroratli reaktorlar metallurgiya, neftni qayta ishlash va vodorod ishlab chiqarish sanoatida keng qo'llanilishi mumkin. Suyuq natriy yoki qo'rg'oshin-bismut qotishmasi bilan sovutiladigan tez neytronli reaktorlar esa yonilg'idan foydalanish samaradorligini oshirish imkoniyatiga ega – ular chiqindi yadro materiallarini "yoqib", radioaktiv chiqindilarning hajmini va xavf darajasini kamaytirishi mumkin.

Iqtisodiy samaradorlik nuqtai nazaridan KM AESlarning asosiy ustunligi kapital xarajatlarning pasayishi va qurilish muddatlarining qisqarishida namoyon bo'ladi. An'anaviy yirik AESning qurilishi 8-12 yil davom etadi va 6-10 milliard dollar sarmoya talab qilsa, bitta 60-100 MVt li KM AES moduli 3-4 yil ichida qurilishi mumkin va uning narxi 1-1,5 milliard dollarni tashkil qiladi. Modulli qurilish tamoyili bu jarayonni yanada optimallashtiradi – reaktor komponentlari zavod sharoitida seriyali ishlab chiqariladi, sifati qat'iy nazorat qilinadi va keyin qurilish maydonchasiga etkaziladi, u erda faqat yig'ish ishlari olib boriladi. Bu nafaqat qurilish muddatini qisqartiradi, balki maydonchadagi ishchilar sonini va radiatsiya xavfini ham kamaytiradi. Shu bilan birga, bir nechta modullarni bosqichma-bosqich o'rnatish imkoniyati investorlarga boshlang'ich kapital xarajatlarni bosqichma-bosqich kiritish va energiya bozoridagi talab o'zgarishlariga moslashish imkonini beradi. Qo'shimcha ravishda, kichik o'lchamlar va kamroq infratuzilma talablari tufayli KM AESlar yirik AESlar uchun mos bo'lmagan hududlarga – masofaviy qishloq joylariga, orollarga yoki sanoat zonlariga o'rnatilishi mumkin. Bu ularni turli mintaqalar uchun energiya xavfsizligini oshirishning universal vositasi sifatida ko'rsatadi.

Tarmoqqa integratsiya qilish qobiliyati KM AESlarning yana bir muhim afzalligi hisoblanadi. Bugungi kunning energetika tizimlari tobora ko'proq o'zgaruvchan va tarqoq energiya manbalarini o'z ichiga olmoqda. KM AESlar quyosh va shamol energetikasi kabi manbalarining "to'ldiruvchisi" sifatida ishlashi mumkin – ular shamolsiz va bulutli kunlarda barqaror energiya ta'minotini kafolatlaydi. Aqlli tarmoqlar (smart grids) texnologiyalari bilan integratsiya qilingan holda, KM AESlar avtomatik ravishda ishlash rejimini o'zgartirib, tarmoq chastotasi va kuchlanishini barqarorlashtirishda ishtirok etishi mumkin. Bundan tashqari, KM AESlar energetika tizimlarining moslashuvchanligini oshirish uchun "energiya konvertorlari" sifatida ishlatilishi mumkin – ular elektr energiyasini ishlab chiqarishdan tashqari, issiqlik energiyasini iste'molchilarga yetkazib berish, suvni tuzdan tozalash yoki vodorod ishlab chiqarish uchun ham foydalanish mumkin. Xususan, KM AES asosida ishlaydigan vodorod elektroliz stansiyalari yashil vodorod ishlab chiqarishning eng samarali usullaridan biri hisoblanadi.

Xalqaro xavfsizlik standartlari va regulyator talablariga muvofiqligi KM AESlarni joriy etishdagi asosiy muammolardan biridir. An'anaviy yirik reaktorlar uchun ishlab chiqilgan regulyator me'yorlar va sertifikatlash tartiblari ko'pincha KM AESlar uchun mos kelmaydi, chunki ularning fizik xususiyatlari, xavf profillari va ishlash tamoyillari tubdan farq qiladi. Masalan, evakuatsiya zonasini aniqlashda amaldagi qoidalar aholi zich joylashgan hududlarda KM AES o'rnatishni deyarli imkonsiz qiladi, garchi KM AES dizaynlarida radiokativ chiqindilarning keng tarqalishi ehtimoli ancha past bo'lsa ham. Shu sababli, Xalqaro Atom Energiyasi Agentligi (IAEA) va milliy regulyator organlar yangi "dizaynga asoslangan regulyator me'yorlar"ni ishlab chiqmoqda, ular KM AESlarning o'ziga xos xususiyatlarini hisobga oladi. Ushbu yangi yondashuvda asosiy e'tibor "fizik qonunlarga asoslangan" himoya tamoyillariga va realistik xavf baholash metodologiyalariga qaratiladi. Biroq, har xil mamlakatlarda regulyator tizimlarning o'zaro mos kelmasligi KM AES texnologiyalarining global miqyosda tarqalishiga to'sqinlik qilmoqda.

Yadro yoqilg'isi tsikli va chiqindilarni boshqarish masalalari ham KM AESlarni amaliy joriy etishda muhim rol o'ynaydi. An'anaviy AESlarga nisbatan KM AESlar kamroq miqdorda yadro yoqilg'isi iste'mol qiladi, ammo yonilg'ining yadroviy proliferatsiyaga qarshi rejimlarga muvofiqligini ta'minlash talablari bir xil darajada qat'iy. Ko'pgina KM AES dizaynlari 5-7 yillik uzaytirilgan yonilg'i tsiklini taklif etadi, bu esa yonilg'ini almashtirish operatsiyalari sonini kamaytiradi va shu bilan radiatsion xavfni pasaytiradi. Chiqindilarni boshqarishda esa kichik o'lchamlarning o'ziga xos muammolari mavjud – KM AESlarning chiqindilari yirik AESlar bilan taqqoslaganda miqdori kamroq bo'lsa-da, ularni qayta ishlash va saqlash infratuzilmasini yaratish iqtisodiy jihatdan murakkab bo'lishi mumkin. Shu sababli, bir nechta KM AES modullarini bitta joyda joylashtirish va ular uchun umumiy chiqindilarni boshqarish tizimini yaratish maqsadga muvofiqdir.

KM AES texnologiyalarining kelajakdagi rivojlanish tendensiyalari quyidagi yo'nalishlarda ko'zda tutilgan: birinchidan, o'ta xavfsiz va iqtisodiy jihatdan raqobatbardob bo'lgan tijorat dizaynlarini yaratish; ikkinchidan, turli energetika tizimlari va iqtisodiyot tarmoqlari bilan integratsiyani chuqurlashtirish; uchinchidan, sun'iy intellekt va raqamlashtirish texnologiyalarini keng joriy etish orqali avtomatlashtirish va monitoringni yaxshilash; to'rtinchidan, xalqaro hamkorlikni kuchaytirish va regulyator mexanizmlarni uyg'unlashtirish. Shuningdek, KM AES texnologiyalarining muvaffaqiyati to'g'ridan-to'g'ri jamoatchilik qabuli va shaffoflik darajasiga bog'liq bo'lib, bu esa yadroviy xavfsizlik madaniyatini rivojlantirish va atrof-muhit ta'sirini ochiq muhokama qilishni talab qiladi.

Xulosa

Kichik modulli atom elektr stansiyalari (KM AES) zamonaviy atom energetikasining strategik rivojlanish yo'nalishi sifatida kuchli xavfsizlik, yuqori

iqtisodiy samaradorlik va energetika tizimlariga moslashuvchan integratsiya qobiliyatini birlashtirgan innovatsion texnologiyadir. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, KM AES texnologiyalari an'anaviy yirik AESlarga qaraganda bir qator asosiy afzalliklarga ega:

Xavfsizlik jihatidan KM AES dizaynlari passiv xavfsizlik tamoyillariga asoslangan bo'lib, ular tabiiy fizik qonunlar (tortishish kuchi, tabiiy konveksiya) yordamida har qanday energiya ta'minoti uzilganida ham issiqlikni samarali olib chiqish imkonini beradi. Integral dizayn yechimlari, yaxlit qobiq konstruksiyalari va yuqori haroratga chidamli yonilg'i materiallari radiokativ moddalarning atrof-muhitga chiqish xavfini minimal darajaga tushiradi. To'rtinchi avlod reaktor kontseptsiyalari asosida ishlab chiqilgan KM AESlarning o'z-o'zidan barqaror reaktivlik koeffitsientlari avariya holatlarida inson aralashuvisiz xavfsizlikni avtomatik ta'minlaydi.

Energiya samaradorligi nuqtai nazaridan KM AES texnologiyalari an'anaviy suv bilan bosim ostidagi reaktorlarga nisbatan yuqoriroq termal samaradorlikni namoyish etadi. Yuqori haroratli gaz bilan sovutiladigan reaktorlar (HTGR) 45% gacha bo'lgan samaradorlik bilan nafaqat elektr energiyasi, balki sanoat ishlab chiqarish uchun yuqori haroratli issiqlik ham ishlab chiqarishi mumkin. Tez neytronli reaktorlar yonilg'idan foydalanish samaradorligini sezilarli darajada oshirib, chiqindi yadro materiallarini qayta ishlash orqali radioaktiv chiqindilar hajmini kamaytiradi.

Iqtisodiy samaradorlik tamoyillari bo'yicha KM AESlarning modulli qurilish usuli kapital xarajatlarni kamaytirish, qurilish muddatini qisqartirish (3-4 yilgacha) va sifati yaxshilash imkonini beradi. Bir nechta modullarni bosqichma-bosqich o'rnatish imkoniyati investorlarga moslashuvchan moliyalashtirish va energiya bozoridagi o'zgarishlarga tezkor javob berish imkonini yaratadi. KM AESlarning kichik o'lchamlari ularni infratuzilma rivojlanganligi cheklangan hududlar, orollar va sanoat zonlarida ham o'rnatish imkoniyatini ochadi.

Tarmoqqa integratsiya qilish qobiliyati KM AESlarni zamonaviy energetika tizimlarining ajralmas qismiga aylantiradi. Ular quyosh va shamol kabi o'zgaruvchan qayta tiklanuvchi manbalarni barqarorlashtiruvchi "baza yuki" vazifasini bajaradi, aqlli tarmoqlar bilan uzviy birlashadi va ko-generatsiya, suvni tuzdan tozalash hamda yashil vodorod ishlab chiqarish kabi ko'p qirrali funktsiyalarni amalga oshirishi mumkin.

Qiyinchiliklar va istiqbollar nuqtai nazaridan KM AES texnologiyalarini keng miqyosda joriy etish regulyator mexanizmlarni uyg'unlashtirish, jamoatchilik ishonchini oshirish va ixtisoslashtirilgan kadrlar tayyorlashni talab etadi. Xalqaro Atom Energiyasi Agentligi (IAEA) tomonidan ishlab chiqilayotgan "dizaynga asoslangan regulyator me'yorlar" ushbu texnologiyalarning xavfsizligini baholashda yagona yondashuvni shakllantirishga xizmat qiladi. Kelajakda KM AES texnologiyalarining rivojlanishi sun'iy intellekt asosidagi boshqaruv tizimlari,

raqamlashtirilgan monitoring va xalqaro hamkorlikni kuchaytirish yoʻnalishlarida davom etadi.

Xulosa qilib aytish mumkinki, KM AES texnologiyalari global energiya muammolarini hal qilishda muhim rol oʻynaydigan, xavfsiz, samarali va ekologik toza energiya manbai sifatida atom energetikasining barqaror rivojlanishini taʼminlaydi. Ushbu texnologiyalarni joriy etish energiya xavfsizligini mustahkamlash, uglerod izini kamaytirish va barqaror iqtisodiy oʻsishni ragʻbatlantirish imkoniyatlarini kengaytiradi.

Foydalanilgan adabiyotlar:

- 1) IAEA. (2022). *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- 2) IAEA. (2021). *Design Safety Considerations for Small Modular Reactors*. IAEA Safety Standards Series No. SSG-65.
- 3) IAEA. (2020). *Economics of Nuclear Power and Climate Change Mitigation*. IAEA Nuclear Energy Series.
- 4) OECD/NEA. (2023). *Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities*. Nuclear Energy Agency, Paris.
- 5) World Nuclear Association. (2023). *Small Modular Reactors: A Global Perspective*. WNA Report.
- 6) IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Working Group III Report, Chapter 6 (Energy Systems).
- 7) Ingersoll, D. T., & Houghton, Z. J. (2021). *The NuScale SMR: Design and Safety Features*. Nuclear Engineering and Design, 380, 111234.
- 8) Locatelli, G., Bingham, C., & Mancini, M. (2019). *Small Modular Reactors: A Comprehensive Overview of Their Economics and Strategic Aspects*. Progress in Nuclear Energy, 73, 75-85.
- 9) Pioro, I., & Duffey, R. (2020). *Current Status of Generation IV Reactors and Future Prospects*. In *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors* (pp. 1-35). Elsevier.
- 10) Vujić, J., et al. (2021). *Small Modular Reactors: Simpler, Safer, Cheaper?* Energy, 238, 121631.