

INTELLEKTUAL BOSHQARUVGA ASOSLANGAN AKKUMULYATORLI ELEKTR ENERGIYA SAQLASH TIZIMLARINING ZAMONAVIY NAZARIY VA AMALIY

YECHIMLARI

A.N. Ramatov

D.S. Kuchumov

Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti.

O'zbekiston, 100095, Toshkent sh., Universitet ko'chasi, 2

e-mail: diyorbeksobirovic008@gmail.com<https://doi.org/10.5281/zenodo.18042808>

Annotatsiya. Ushbu maqolada akkumulyatorli elektr energiya saqlash tizimlarining (AEST) zamonaviy nazariy asoslari, intellektual boshqaruv tizimlari bilan integratsiyasi hamda amaliy yechimlari batafsil tahlil qilingan. Sun'iy intellekt, algoritmik o'rganish va raqamli model yaratish texnologiyalari asosida (akkumulyatorli elektr energiya saqlash tizimlari) AEST'larning ishlash samaradorligini oshirish yo'llari ko'rib chiqilgan. Shuningdek, O'zbekiston energetika tizimi sharoitida bunday tizimlarni joriy etish istiqbollari yoritilgan.

Kalit so'zlar: energiya saqlash, akkumulyator tizimi, intellektual boshqaruv, integratsiya, sun'iy intellekt, qayta tiklanuvchi energiya, smart grid.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АККУМУЛЯТОРНЫМИ СИСТЕМАМИ ХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Аннотация. В данной статье подробно рассмотрены современные теоретические основы аккумуляторных систем хранения электроэнергии (АСХЭ), их интеграция с интеллектуальными системами управления, а также практические решения в этой области. Анализируются пути повышения эффективности работы АСХЭ на основе технологий искусственного интеллекта, машинного обучения и цифровых двойников.

Кроме того, освещены перспективы внедрения подобных систем в энергетическую инфраструктуру Республики Узбекистан.

Ключевые слова: хранение энергии, аккумуляторная система, интеллектуальное управление, интеграция, искусственный интеллект, возобновляемые источники энергии, smart Grid.

INTELLIGENT CONTROL OF BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS: MODERN THEORETICAL AND PRACTICAL SOLUTIONS

Abstract. This article provides a detailed analysis of the modern theoretical foundations of battery energy storage systems (BESS), their integration with intelligent control systems, and practical solutions in this field. The study examines ways to improve the efficiency of BESS operation based on artificial intelligence, machine learning, and digital twin technologies. Furthermore, the prospects for implementing such systems within the energy infrastructure of the Republic of Uzbekistan are discussed.

Keywords: energy storage, battery system, intelligent control, integration, artificial intelligence, renewable energy sources, smart Grid.

Kirish

Elektr ta'minoti tizimlarining samarali ishlashi zamonaviy jamiyatda muhim ahamiyatga ega. Energiya resurslari har bir sohaning ishlashida asosiy rol o'ynaydi, shu bilan birga, ularning ishonchliligi va barqarorligi global miqyosda alohida ahamiyat kasb etadi.

Intellektual boshqaruv tizimlari (IBT) orqali elektr ta'minoti tizimlarining samaradorligi oshirilishi mumkin. Sun'iy intellekt (AI), mashinaviy o'rganish (ML), va avtomatik boshqaruv texnologiyalari yordamida tizimni real vaqt rejimida monitoring qilish, energiya isrofiga yo'l qo'ymaslik, va tizim uzilishlarini oldini olish imkoniyatlari mavjud. Ushbu maqolada elektr ta'minoti tizimlarida intellektual boshqaruv tizimlarining asosiy tamoyillari, ularning afzalliklari, muammolarni hal qilishdagi roli va kelajakdagi rivojlanishi haqida batafsil tahlil keltirilgan.

Akkumulyator elektr energiyasi saqlash tizimlari birinchi yuzaga qaraganda o'zgaruvchanroq. Ushbu tizimlar akkumulyatorlar, inverterlar va yuklangan tizimlardan iborat.

Akkumulyatorlar energiya saqlash uchun ishlatiladigan qurilmalar... har xil hajmdagi qutular sizning narsalaringizni saqlash uchun mavjud. Litium-ion akkumulyatorlar eng mashhur, chunki ular umuman energiya miqdori ko'p va davom etadi va praktikada turli xolda muayyan to'g'ri holatda saqlanadi. Shuningdek, DC chiqishini AC ga aylantirish uchun inverterlarni e'tiborsiz qoldirmaymiz. Demak, shu elektr energiyasi uy va kasblariga kiradi. Yuklash tizimlari esa tizim to'g'ri ishlashi uchun ishlatiladi va batareya energiya talab qilsa uni to'ldiradi.

So'nggi yillarda elektr energetika tizimlarida qayta tiklanuvchi energiya manbalarining ulushi sezilarli darajada oshib bormoqda. Quyosh va shamol kabi manbalar o'zining ekologik tozaligi bilan ajralib tursada, ularning ishlab chiqarish quvvati tabiiy sharoitlarga bog'liq ravishda o'zgaruvchan bo'lgani sababli elektr tarmoqlarda kuchlanish tebranishlari, quvvat disbalansi va barqarorlik muammolari yuzaga kelmoqda. Ushbu muammolarni bartaraf etishning eng samarali yo'llaridan biri akkumulyatorli elektr energiya saqlash tizimlarini (AEST) taqsimlovchi elektr tarmoqlar tarkibiga integratsiya qilishdir.

AEST yordamida tarmoqda ortiqcha ishlab chiqarilgan energiyani vaqtincha saqlab turish va yuklama ortgan davrda uni qayta tarmoqqa berish mumkin. Bu esa elektr energiyasi ta'minotining ishonchliligini oshiradi, quvvat yo'qotishlarini kamaytiradi hamda energiya sifatini yaxshilaydi. Shuningdek, bunday tizimlar elektr energiyasining dinamik talablarini qondirish, chastota va kuchlanishni barqarorlashtirish, shuningdek, qayta tiklanuvchi energiya manbalari bilan birgalikda ishlashda muhim rol o'ynaydi. Energetika sohasida so'nggi o'n yillikda global o'zgarishlar sodir bo'lmoqda. Dunyo bo'ylab energiya iste'moli ortib borar ekan, an'anaviy manbalar (ko'mir, gaz, neft)ning ekologik ta'siri kuchaymoqda. Shu sababli qayta tiklanuvchi energiya manbalari (quyosh, shamol, gidro, biomassa)ni joriy etish muhim yo'nalishga aylandi.

Biroq, qayta tiklanuvchi energiya manbalarining asosiy muammosi ishlab chiqarishdagi uzluksizlik va barqarorlikning yo'qligidir. Shamol to'xtasa yoki quyosh nurlari kamayganda ishlab chiqarish quvvati pasayadi. Shu sababli, elektr energiyasini saqlash tizimlari (EEST yoki AEST) bunday o'zgaruvchan manbalarining barqarorligini ta'minlashda hal qiluvchi rol o'ynaydi.

Energiyani saqlash texnologiyalari ichida akkumulyatorli tizimlar eng keng tarqalgan, moslashuvchan va amaliy hisoblanadi. Ularning ishlash samaradorligini oshirishda intellektual boshqaruv tizimlari (IBT), ya'ni sun'iy intellekt va raqamli algoritmlar muhim ahamiyatga ega.

Maqolada taqsimlovchi elektr tarmoqlarda akkumulyatorli energiya saqlash tizimlarini (AEST) samarali boshqarish usullari va algoritmlarini ishlab chiqish orqali elektr energiya ta'minoti ishonchliligini oshirish, tarmoqdagi aktiv va reaktiv quvvat yo'qotishlarini kamaytirish, hamda energiya iste'molini optimallashtirishdan iborat.

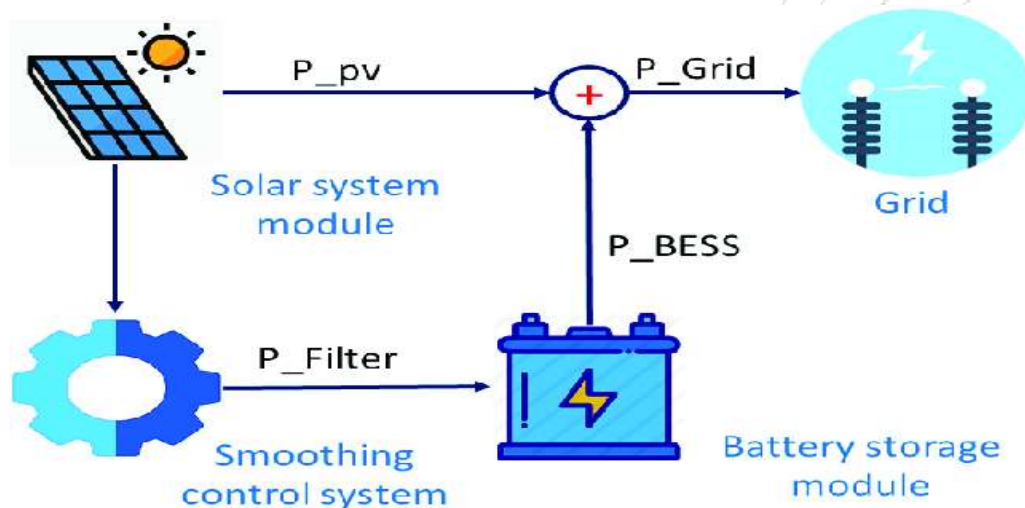
Elektr energiyasi ishlab chiqarish va iste'mol jarayonlarida AESTlarning ta'sirini matematik modellash va ularning optimal joylashtirilish sharoitlarini aniqlash. AESTlar yordamida aktiv va reaktiv quvvatlarni boshqarish yo'llarini ishlab chiqish hamda ularning

samaradorligini baholash. Energiya saqlash tizimlarini boshqarishda zamonaviy usullar sun'iy intellekt, bashoratlash modullari va adaptiv algoritmlarni qo'llash imkoniyatlarini o'rganish.

Taklif etilgan boshqaruv algoritmlarini amaliy tarmoq modeli misolida sinovdan o'tkazish va natijalar asosida tavsiyalar ishlab chiqish.

Akkumulyatorli energiya saqlash tizimlarining texnik asoslari

AEST bu elektr energiyasini zaryad shaklida saqlab, kerakli paytda tarmoqqa qayta uzatadigan kompleks tizimdir. Bu tizim elektr ta'minoti ishonchliligini oshirish, tarmoqlarda yuklama tebranishlarini silliqalashtirish, quvvat sifati va barqarorligini ta'minlashda muhim rol o'ynaydi. Tizim quyidagi asosiy qismlardan iborat:



Akkumulyator turlari va ularni solishtirish.

Akkumulyator turi	Energiya zichligi (Wh/kg)	Xizmat muddati (tsikl)	Afzalliklari
Litiy-ion (Li-ion)	150–250	2000–5000	Yuqori zichlik, yengil, tez zaryadlanadi
Litiy temir fosfat (LFP)	100–160	5000–7000	Barqaror, xavfsiz, uzoq umr
Natriy-ion	90–120	2000–4000	Arzon xomashyo, ekologik xavfsiz
Superkondensator	5–10	100000+	Juda tez zaryad/razryad, lekin kam sig'im

Akkumulyatorli energiya saqlash tizimlarining (AESS) texnik asoslari batareya hujayralari, ularni boshqaradigan tizimlar va energiya aylantirgichlardan iborat. Asosiy komponentlar: batareya hujayralari, batareyani boshqarish tizimi (BMS), quvvatni o'zgartirish tizimi (PCS), issiqlikni boshqarish tizimi, uy-joy/himoya va xavfsizlik tizimi. Ular energiyani saqlash, uni kerakli shaklga (masalan, doimiy tokdan o'zgaruvchan tokgacha) aylantirish va tizimni xavfsiz ishlashini ta'minlash uchun mo'ljallangan.

AESSning asosiy texnik qismlari:

Batareya/energiya saqlash hujayralari: Energiyani kimyoviy shaklda saqlaydi va zarur bo'lganda uni chiqaradi.

Batareyani boshqarish tizimi (BMS): Har bir hujayraning kuchlanishi, oqimi va harorati kabi parametrlarni nazorat qilib, batareya hujayralarining samaradorligini va xavfsizligini ta'minlaydi.

Quvvatni o'zgartirish tizimi (PCS): Batareyadagi doimiy tok (DC)ni o'zgaruvchan tokga (AC) aylantiradi, bu esa dasturlar yoki tarmoq uchun zarurdir.

Issiqlikni boshqarish tizimi: Batareyalarni optimal ish haroratida saqlab, ularning ishlash muddati va samaradorligini oshiradi.

Uy-joy va himoya: Batareya komponentlarini jismoniy shikastlanishlardan himoya qiladi va ularni bir-biriga mahkamlaydi.

Monitoring va nazorat qilish tizimi: Sensorlar ma'lumotlarini to'playdi va tizim holatini masofadan kuzatish imkonini beradi.

Xavfsizlik tizimi: Haddan tashqari oqim, qisqa tutashuvlar va yong'in xavfini oldini olish uchun sug'urtalar, o'chirgichlar va boshqa himoya mexanizmlarini o'z ichiga oladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Exploitation of Battery Energy Storage in Load Frequency Control - A Literature Survey (A. Zurfi, J. Zhang) — American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016.
2. A Novel Modular, Reconfigurable Battery Energy Storage System: Design, Control, and Experimentation (A. Farakhori, D. Wu, Y. Wang, H. Fang) — 2023 (arXiv).
3. Mirzayev, A. O'zbekiston energetika tizimida qayta tiklanuvchi manbalarni integratsiya qilishning zamonaviy yondashuvlari. Energetika va avtomatika jurnali, 2024.
4. Khan, M.J., *Integration of AI-based energy storage in smart grids*. IEEE Transactions on Power Systems, 2022.
5. Javadi M., Gong Y. and Chung C.Y. Frequency Stability Constrained BESS Sizing Model for Microgrids // IEEE Transactions on Power Systems, vol. 39, no. 2, pp. 2866-2878, March 2024, doi: 10.1109/TPWRS.2023.3284854.
6. "Experience in implementing modern energy storage systems in Uzbekistan" ResearchGate/mahalliy mualliflar (2024–2025)