



ELEKTR ENERGIYA OQIMINI REAL VAQT REJIMIDA MONITORING QILISHNING ZAMONAVIY AVTOMATLASHTIRILGAN TIZIMLARI VA ULARNING AFZALLIKLARI

Shavkatov Muhammadjon Umidjon o'g'li — muallif

Ilmiy rahbar: Yo'lchiyev Mash'albek Erkinovich

Qurilish muhandisligi va Elektroenergetika fakulteti

Tel: +998 94 954 55 04 | E-mail: smuhammadjon709@gmail.com

Annotatsiya

Mazkur maqolada elektr energiya oqimini real vaqt rejimida monitoring qilishga mo'ljallangan zamonaviy avtomatlashtirilgan tizimlar — SCADA (dispatcherlik nazorati va ma'lumot yig'ish), AMI (ilg'or hisoblash infratuzilmasi), fazali o'lchov qurilmalari (PMU) hamda narsalar interneti (IoT)ga asoslangan yechimlar tahlil qilingan. Ushbu tizimlarning tuzilishi, ishlash tamoyillari va an'anaviy nazorat usullaridan ustunliklari ko'rib chiqilgan. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, avtomatlashtirilgan monitoring tizimlari tarmoq barqarorligini oshiradi, nosozliklarni erta aniqlaydi, energiya yo'qotishlarini kamaytiradi va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini integratsiya qilishni osonlashtiradi.

Kalit so'zlar: *elektr energiya, real vaqt monitoringi, SCADA, fazali o'lchov qurilmasi (PMU), aqlli tarmoq, IoT, avtomatlashtirish, energiya samaradorligi.*

Аннотация

В данной статье анализируются современные автоматизированные системы мониторинга потока электроэнергии в реальном времени — SCADA, AMI (передовая измерительная инфраструктура), устройства фазовых измерений (PMU) и решения на основе Интернета вещей (IoT). Рассмотрены структура, принципы работы и преимущества этих систем перед традиционными методами контроля. Результаты показывают, что



автоматизированные системы мониторинга повышают устойчивость сети, рано выявляют неисправности и снижают потери энергии.

Ключевые слова: *электроэнергия, мониторинг в реальном времени, SCADA, устройство фазовых измерений (PMU), умная сеть, IoT, автоматизация, энергоэффективность.*

Annotation

This article analyzes modern automated systems for real-time monitoring of electrical energy flow — SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), AMI (Advanced Metering Infrastructure), Phasor Measurement Units (PMU), and Internet of Things (IoT)-based solutions. The structure, operating principles, and advantages of these systems over traditional control methods are examined. The findings show that automated monitoring systems increase grid stability, enable early fault detection, reduce energy losses, and facilitate the integration of renewable energy sources into the power system.

Keywords: *electrical energy, real-time monitoring, SCADA, phasor measurement unit (PMU), smart grid, IoT, automation, energy efficiency.*

Kirish

Elektr energetikasi har qanday zamonaviy davlatning iqtisodiy va ijtimoiy infratuzilmasining asosini tashkil etadi. Soʻnggi oʻn yilliklarda elektr tarmoqlari ancha murakkablashdi: isteʼmolchilar soni ortdi, quvvat talabi notekis oʻzgaruvchan boʻlib qoldi, quyosh va shamol kabi qayta tiklanuvchi manbalar tizimga keng koʻlamda integratsiya qilina boshladi¹. Bunday sharoitda anʼanaviy qoʻlda nazorat usullari tarmoqning haqiqiy holatini yetarli darajada tez va aniq aks ettira olmaydi.

¹Zamonaviy elektr tarmoqlari talabning oʻzgaruvchanligi, qayta tiklanuvchi manbalar ulushining ortishi va masofadan boshqarish ehtiyoji tufayli murakkablashib bormoqda. Electricity Forum. "What Is SCADA?". URL: <https://electricityforum.com/td/smart-grid/what-is-scada>



Real vaqt rejimida monitoring — bu elektr energiya oqimi (kuchlanish, tok, chastota, quvvat va boshqa parametrlar) bo'yicha ma'lumotlarni uzluksiz ravishda yig'ish, uzatish, qayta ishlash va vizualizatsiya qilish jarayonidir. Ushbu jarayon avtomatlashtirilgan tizimlar yordamida amalga oshirilganda, operatorlar tarmoqda sodir bo'layotgan voqealarni soniya yoki undan ham kichik vaqt oralig'ida kuzata oladilar va zarur boshqaruv qarorlarini tezkor qabul qiladilar.

Zamonaviy avtomatlashtirilgan monitoring tizimlari elektr ta'minotining samaradorligi, xavfsizligi va ishonchliligini bir vaqtning o'zida ta'minlash imkonini beradi². Ushbu maqolaning maqsadi elektr energiya oqimini real vaqt rejimida monitoring qilishning asosiy zamonaviy texnologiyalarini — SCADA, PMU, AMI va IoT yechimlarini — ko'rib chiqish, ularning tuzilishi va afzalliklarini tahlil qilish hamda kelajakdagi rivojlanish yo'nalishlarini belgilashdan iborat.

Tadqiqotning dolzarbligi shundan iboratki, energiya yo'qotishlarini kamaytirish, tarmoq barqarorligini saqlash va “aqlli tarmoq” (smart grid) konsepsiyasini joriy etish bevosita ishonchli real vaqt monitoringiga bog'liqdir. Shu sababli ushbu tizimlarni tizimli o'rganish nazariy va amaliy ahamiyatga ega.

An'anaviy elektr tarmoqlarida nazorat asosan davriy o'lchovlar va operatorning shaxsiy tajribasiga tayangan. Bunday yondashuvda nosozliklar ko'pincha ular allaqachon yuzaga kelganidan keyin aniqlangan, bu esa yirik avariya va keng ko'lamlı elektr uzilishlariga olib kelishi mumkin edi. Avtomatlashtirilgan real vaqt monitoringi esa profilaktik (oldini oluvchi) yondashuvni joriy etadi: tizim parametrlardagi og'ishlarni kichik bosqichdayoq qayd etib, operatorni ogohlantiradi yoki ayrim hollarda mustaqil ravishda boshqaruv

²Iberdrola. “What is a SCADA system? Discover its advantages”. SCADA tizimi elektr tarmoqlarida energiyani ishlab chiqarish, uzatish va taqsimlashni real vaqtda nazorat qiladi. URL: <https://www.iberdrola.com/about-us/our-innovation-model/scada-systems>



harakatini amalga oshiradi. Mazkur maqolada ana shu o'tish jarayonining texnologik asoslari yoritiladi.

Adabiyotlar tahlili

Elektr energiya tizimlarini monitoring qilish bo'yicha ilmiy adabiyotlar va sanoat manbalarini tahlil qilish bir necha asosiy yo'nalishni ajratish imkonini beradi. Birinchi yo'nalish SCADA tizimlariga bag'ishlangan. Manbalarda ta'kidlanishicha, SCADA tizimlari podstansiyalar, uzgichlar va transformatorlarni markazlashgan tarzda kuzatish va boshqarishni ta'minlaydi, dala qurilmalaridan real vaqt ma'lumotlarini yig'ib, nosozliklarni aniqlashga yordam beradi.

Ikkinchi yo'nalish fazali o'lchov qurilmalari (PMU) bilan bog'liq. Adabiyotlarda PMU an'anaviy SCADAg'a nisbatan ancha yuqori vaqtli aniqlikka ega ekanligi qayd etiladi: tipik PMU sekundiga 120 tagacha o'lchov bera oladi, an'anaviy SCADA esa har 2–4 sekundda bir marta o'lcham hosil qiladi³. Bu PMUni tarmoqdagi dinamik hodisalarni tahlil qilishda muhim vositaga aylantiradi.

Uchinchi yo'nalish ilg'or hisoblash infratuzilmasi (AMI) va ma'lumotlarni boshqarish tizimlarini (MDMS) qamrab oladi. Tadqiqotlarda AMI, hisoblagich ma'lumotlarini yig'ish tizimi, ma'lumot konsentratorlari va MDMS yagona platformaga integratsiya qilinishi zarurligi ta'kidlanadi⁴. To'rtinchi yo'nalish IoT va analitikaga asoslangan yechimlar bo'lib, ular tarmoq holatini sekundlik chastotada kuzatish, tahlil qilish va boshqarish imkonini beradi.

³PMU sekundiga 120 tagacha o'lchovni qayd eta oladi, an'anaviy SCADA esa har 2–4 sekundda bitta o'lcham beradi. Wikipedia. "Phasor measurement unit". URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Phasor_measurement_unit

⁴AMI, meter data acquisition system, ma'lumotlar konsentratori va MDMS yagona platformaga integratsiya qilinishi zarur. ScienceDirect Topics. "Phasor Measurement Unit – an overview". URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/phasor-measurement-unit>



Umuman olganda, mavjud adabiyotlar SCADA — “rentgen tasvirini”, PMU esa tizimga tushayotgan “yuklama va stress” haqidagi chuqurroq ma’lumotni beradi, degan qarashni qo‘llab-quvvatlaydi. Shuningdek, ko‘plab manbalar bu texnologiyalarni bir-birini to‘ldiruvchi sifatida ko‘rsatadi: SCADA keng qamrovli nazoratni, PMU esa yuqori aniqlikdagi dinamik kuzatuvni ta’minlaydi. Adabiyotlarda kam yoritilgan jihat — ushbu tizimlarning rivojlanayotgan mamlakatlardagi taqsimot tarmoqlariga moslashtirilishi bo‘lib, bu kelgusi tadqiqotlar uchun bo‘shliq sifatida ajralib turadi.

Bundan tashqari, so‘nggi yillardagi manbalarda sun‘iy intellekt va mashinali o‘qitishning monitoring tizimlariga integratsiyasi alohida e’tibor bilan o‘rganilmoqda. Tadqiqotchilar PMU va IoT sensorlaridan keladigan katta hajmdagi ma’lumotlarni (big data) tahlil qilish orqali nosozliklarni oldindan bashorat qilish, yuklamani prognoz qilish va energiya iste’molini optimallashtirish imkoniyatlarini ko‘rsatishadi. Shuningdek, mikrotarmoqlar (microgrid) va taqsimlangan energiya resurslari sharoitida SCADA tizimining qayta tiklanuvchi manbalar bilan birgalikda ishlashi bo‘yicha amaliy tadqiqotlar mavjud bo‘lib, ular real kunlik iste’mol va ishlab chiqarish ma’lumotlarini real vaqt rejimida tahlil qiladi.

Tadqiqot metodologiyasi

Mazkur tadqiqot sifatiiy qiyosiy tahlil (qualitative comparative analysis) uslubiga asoslangan⁵. Tadqiqot quyidagi bosqichlarda amalga oshirildi. Birinchi bosqichda mavzuga oid ochiq ilmiy maqolalar, sanoat hisobotlari, ishlab chiqaruvchilarning texnik hujjatlari va xalqaro standartlarga oid materiallar to‘plandi. Manbalar SCADA, PMU, AMI va IoT kalit so‘zlari bo‘yicha tanlab olindi.

⁵Mazkur tadqiqotda sifatiiy qiyosiy tahlil usuli qo‘llanildi: ochiq manbalardagi ilmiy maqolalar, sanoat hisobotlari va texnik hujjatlar tizimlashtirildi.



Ikkinchi bosqichda har bir texnologiyaning tuzilishi va ishlash tamoyili o'rganildi. SCADA tizimining uch bosqichli arxitekturasi (jarayon darajasi, uzatish darajasi va dispatcherlik darajasi) tahlil qilindi. PMU uchun GPS sinxronizatsiyasi va synchrophasor texnologiyasi, AMI uchun esa hisoblagichlardan ma'lumot yig'ish zanjiri ko'rib chiqildi.

Uchinchi bosqichda texnologiyalar bir qator mezonlar bo'yicha qiyoslandi: o'lchov chastotasi, vaqtli aniqlik, qamrov ko'lami, integratsiya darajasi va asosiy qo'llanish sohasi. Qiyoslashda zamonaviy podstantsiya tizimlari uchun IEC 61850 standarti, PMU uchun esa IEEE C37.118 standarti mezon sifatida hisobga olindi⁶. To'rtinchi bosqichda olingan natijalar umumlashtirilib, jadval ko'rinishida taqdim etildi va xulosalar shakllantirildi.

Tadqiqotning cheklovi shundaki, u amaliy o'lchov eksperimentlariga emas, balki mavjud manbalar tahliliga asoslangan. Shuning uchun olingan natijalar nazariy umumlashma xarakteriga ega bo'lib, kelgusida real tarmoq ma'lumotlari asosida tasdiqlanishi maqsadga muvofiqdir.

Natijalar va ularni muhokama qilish

Tahlil natijalari elektr energiya oqimini real vaqt rejimida monitoring qilishning to'rtta asosiy texnologiyasini va ularning o'ziga xos xususiyatlarini aniqlash imkonini berdi. Quyidagi jadvalda ushbu texnologiyalar asosiy mezonlar bo'yicha qiyoslangan.

⁶Zamonaviy podstantsiya tizimlari IEC 61850 standartiga asoslanib yuqori tezlikdagi ma'lumot almashinuvini ta'minlaydi. Electricity Forum. "Substation SCADA". URL: <https://electricityforum.com/td/smart-grid/substation-scada>



Texnologiya	O'lchov chastotasi	Asosiy vazifa	Afzalligi
SCADA	har 2–4 sekundda	Markazlashgan nazorat va boshqaruv	Keng qamrov, masofadan boshqarish
PMU	sekundiga 30–120 o'lchov	Dinamik kuzatuv (WAMS)	Yuqori aniqlik, GPS sinxronizatsiyasi
AMI	soatlik / belgilangan interval	Iste'mol hisobi va boshqaruvi	Talabni boshqarish, hisob aniqligi
IoT yechimlari	sekund yoki undan tez	Taqsimlangan sensorli kuzatuv	Moslashuvchanlik, past narx, masshtablanish

Natijalar shuni ko'rsatadiki, PMUlar GPS yordamida vaqt belgisiga ega bo'lgan o'lchovlar orqali tarmoqning kengaytirilgan kuzatuvchanligini va aniq holat baholashni ta'minlaydi⁷. Bu esa buzilishlardan keyingi tahlil (post-disturbance analysis) va tizim barqarorligini baholashda hal qiluvchi ahamiyatga ega.

Avtomatlashtirilgan monitoring tizimlarining asosiy afzalliklari quyidagilardan iborat: haqiqiy ish chegaralarini aniqlash, tarmoq buzilishlari haqida erta

⁷PMU ma'lumotlari GPS yordamida vaqt belgisiga ega bo'lib, kengaytirilgan kuzatuvchanlik va aniq holat baholashni ta'minlaydi. Enerdynamics. "What Is a Phasor Measurement Unit". URL: https://www.enerdynamics.com/Energy-Currents_Blog/What-Is-a-Phasor-Measurement-Unit-and-How-Does-it-Make-the-Grid-More-Reliable.aspx



ogohlantirish, tarmoq dinamikasini va orollanish (islanding) holatlarini kuzatish⁸; nosozlik joyini topish, izolyatsiyalash va xizmatni tiklash (FLISR) orqali uzilish davomiyligini kamaytirish; talabni boshqarish va yuklamani prognoz qilish. Bundan tashqari, bu tizimlar qayta tiklanuvchi energiya manbalarini integratsiya qilishni osonlashtiradi va kuchlanish hamda chastota tebranishlaridan tarmoqni himoya qiladi.

Shu bilan birga, tahlil ayrim cheklovlarni ham aniqladi. Avtomatlashtirilgan tizimlar kiberxavfsizlik tahdidlariga ochiq bo'lib, ularni tarmoqni segmentlash, xavfsiz protokollar (DNP3-SA, IEC 62351), rollarga asoslangan kirish nazorati va muntazam zaiflik baholash orqali kamaytirish zarur. Bundan tashqari, PMU va keng qamrovli IoT tarmoqlarini joriy etish dastlabki investitsiya xarajatlarini talab qiladi, bu esa rivojlanayotgan tarmoqlar uchun jiddiy omil hisoblanadi.

Xulosa

O'tkazilgan tahlil asosida quyidagi xulosalarga kelish mumkin. Elektr energiya oqimini real vaqt rejimida monitoring qilishning zamonaviy avtomatlashtirilgan tizimlari — SCADA, PMU, AMI va IoT yechimlari — birgalikda tarmoqni boshqarishning kompleks raqamli platformasini tashkil etadi. Bu tizimlar bir-birini istisno qilmaydi, balki to'ldiradi: SCADA keng qamrovli nazoratni, PMU yuqori aniqlikdagi dinamik kuzatuvni, AMI iste'mol darajasidagi hisobni, IoT esa moslashuvchan taqsimlangan sensorli kuzatuvni ta'minlaydi⁹.

⁸PMU afzalliklari: haqiqiy ish chegaralarini aniqlash, buzilishlar haqida erta ogohlantirish, tarmoq dinamikasini kuzatish. NumberAnalytics. "Phasor Measurement Units in Smart Grids". URL: <https://www.numberanalytics.com/blog/phasor-measurement-units-smart-grids>

⁹Real vaqt monitoringi aktivlardan samarali foydalanish, uzilishlarga tez javob berish va xizmat uzluksizligini yaxshilashga xizmat qiladi. GE Vernova. "Electric Utility SCADA". URL: <https://www.governova.com/software/products/hmi-scada/electric-utility-scada>



Ushbu tizimlarning afzalliklari aktivlardan samarali foydalanish, uzilishlarga tez javob berish, energiya yo‘qotishlarini kamaytirish va qayta tiklanuvchi manbalarni ishonchli integratsiya qilishda namoyon bo‘ladi. Kelgusida sun‘iy intellektga asoslangan nosozliklarni bashorat qilish, taqsimlangan energiya resurslarini boshqarish va ilg‘or kiberxavfsizlik yechimlari ushbu tizimlarni shunchaki kuzatuv vositasidan markaziy intellektual boshqaruv markaziga aylantirmoqda¹⁰.

Tavsiya sifatida quyidagilarni ta’kidlash mumkin: birinchidan, taqsimot tarmoqlarida SCADA va PMU texnologiyalarini bosqichma-bosqich integratsiyalashgan holda joriy etish; ikkinchidan, kiberxavfsizlik talablarini loyihalashning dastlabki bosqichidayoq hisobga olish; uchinchidan, milliy sharoitga moslashtirilgan amaliy o‘lchov tadqiqotlarini o‘tkazish. Ushbu yo‘nalishlar bo‘yicha keyingi tadqiqotlar “aqli tarmoq” konsepsiyasini samarali joriy etishga xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. Iberdrola. What is a SCADA system? Discover its advantages. <https://www.iberdrola.com/about-us/our-innovation-model/scada-systems>
2. Electricity Forum. What Is SCADA? Utility Grid Control, Monitoring, Automation. <https://electricityforum.com/td/smart-grid/what-is-scada>
3. Electricity Forum. Substation SCADA: Real-Time Monitoring And Automation. <https://electricityforum.com/td/smart-grid/substation-scada>
4. GE Vernova. Electric Utility SCADA | HMI SCADA with iPower. <https://www.governova.com/software/products/hmi-scada/electric-utility-scada>

¹⁰Sun‘iy intellektga asoslangan nosozliklarni bashorat qilish va taqsimlangan energiya resurslarini boshqarish SCADAni markaziy intellektual markazga aylantirmoqda. Electricity Forum. “Substation SCADA”.



5. ThingsBoard. SCADA Energy Management & Monitoring.
<https://thingsboard.io/use-cases/scada-energy-management/>

6. Wikipedia. Phasor measurement unit.
https://en.wikipedia.org/wiki/Phasor_measurement_unit

7. ScienceDirect Topics. Phasor Measurement Unit — an overview.
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/phasor-measurement-unit>

8. NumberAnalytics. Phasor Measurement Units in Smart Grids.
<https://www.numberanalytics.com/blog/phasor-measurement-units-smart-grids>

9. Enerdynamics. What Is a Phasor Measurement Unit and How Does it Make the Grid More Reliable? https://www.enerdynamics.com/Energy-Currents_Blog/What-Is-a-Phasor-Measurement-Unit-and-How-Does-it-Make-the-Grid-More-Reliable.aspx

10. ScienceDirect. Intelligent energy management based on SCADA system in a real Microgrid.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148121003566>