

ENERGETIK TIZIMLARDA AVARIYA HOLATLARINI OLDINDAN ANIQLASH ALGORITMLARI

Tolipova Surayyo Baxodirovna

Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti o'qituvchisi

Mamadjonov Jasurbek Farhodjon o'g'li

Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti Energetika muhandisligi fakulteti talabasi

Kamolov Jamshid Rashid o'g'li

Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti Energetika muhandisligi fakulteti talabasi

Annotatsiya: Ushbu maqolada elektr energetik tizimlarda avariya holatlarini oldindan aniqlashning zamonaviy algoritmlari va usullari tahlil qilinadi. Energetik tizimlarning murakkabligi, yuklarning ortib borishi va qayta tiklanuvchi energiya manbalarining o'sib borayotgan ulushi tizim barqarorligini saqlash va keng ko'lamli avariylarning oldini olish uchun samarali diagnostika va prognozlashtirish algoritmlarini talab qilmoqda. Maqolada statistik tahlil, signallarni qayta ishlash, sun'iy intellekt va mashina o'rganish (ML) asosida ishlaydigan avariylarni erta aniqlash tizimlari ko'rib chiqiladi.

Kalit so'zlar: Energetik tizim avariylari, oldindan aniqlash algoritmlari, mashina o'rganish, sun'iy intellekt, tarmoq barqarorligi, SCADA, PMU, real vaqt monitoringi, erta diagnostika, prognozlashtirish tizimlari.

Kirish

Elektr energetik tizimlari - murakkab, dinamik va bir-biri bilan chambarchas bog'liq komponentlardan tashkil topgan tarmoq bo'lib, zamonaviy jamiyatning hayotiy faoliyatini ta'minlashda asosiy rol o'ynaydi. Tarmoqlarning kengayishi, yuklarning doimiy o'sishi, qayta tiklanuvchi energiya manbalarining (quyosh, shamol) o'sib borayotgan ulushi va tarmoqqa ulanadigan yangi texnologiyalar (elektromobillar, aqlli tarmoqlar) elektr tizimlarini yanada murakkablashtirib, ularning ishlash xavfsizligi va barqarorligini saqlash muammosini keltirib chiqarmoqda. Bunday sharoitda elektr tizimlarida avariya holatlarini oldindan aniqlash va ularning oldini olish muhandislik amaliyotining dolzarb muammolaridan biriga aylanmoqda.

Tarixiy jihatdan, energetik tizimlarda avariylarni boshqarish ko'pincha reaktiv (reactive) yondashuvga asoslangan bo'lib, avariya sodir bo'lgandan keyin uni bartaraf etish va tizimni tiklashga qaratilgan edi. Biroq, keng ko'lamli avariylar (blackouts) iqtisodiyotga milliardlab dollar zarar yetkazishi, infratuzilmaning uzilishiga olib kelishi va hatlon inson hayotiga tahdid solishi mumkinligi sababli, so'nggi yillarda

proaktiv (proactive) va prognostik (predictive) yondashuvlarga e'tibor kuchaymoqda. Bunda avariya yuz bergunga qadar, hatto uning dastlabki belgilarini aniqlab, tizimni stabil holatga olib kelish yoki avariyaning kengayishini cheklash maqsad qilinadi.

Avariyalarni oldindan aniqlashning murakkabligi tizimning o'zi qanchalik murakkab ekanligi bilan belgilanadi. Elektr tizimi minglab generatorlar, transformatorlar, uzatish liniyalari, kommutator qurilmalari va iste'molchilardan tashkil topgan bo'lib, ularning har biri real vaqt rejimida o'zaro ta'sirlashadi. Bundan tashqari, tizimga ta'sir etuvchi tashqi omillar - ob-havo sharoitlari, yashirin nuqsonlar, inson omili, kiberhujumlar - avariya ehtimolini yanada oshiradi. An'anaviy himoya tizimlari (rele himoyasi) o'z maqsadlariga erisha olmay qolayotganligi sezilib, ular faqat aniq parametrlar (masalan, ortiqcha tok) chegarasidan oshganda ishga tushadi, ya'ni avariya allaqachon boshlangandan keyin. Shuning uchun, erta ogohlantirish tizimlari - tizimning "sog'lig'ini" doimiy monitoring qilish va uning barqarorligini buzadigan og'ishlarni iloji boricha erta aniqlashga qaratilgan tizimlar zarurati yuzaga keldi.

So'nggi o'n yilliklarda axborot texnologiyalari, ma'lumotlar tahlili va hisoblash imkoniyatlarining rivojlanishi avariyalarni oldindan aniqlash sohasida yangi imkoniyatlar ochdi. Katta hajmdagi va real vaqt rejimida o'lchanayotgan ma'lumotlar (Big Data) - SCADA tizimlari, fazor o'lchash qurilmalari (PMU), smart-schetchiklar va sensorlar to'plagan ma'lumotlar - tizim holatini aniq baholash va uning normal ishlashidan og'ishlarni aniqlash uchun asos bo'la oladi. Shu bilan birga, sun'iy intellekt (AI) va mashina o'rganish (ML) algoritmlari ushbu ma'lumotlarni tahlil qilish, murakkab naqshlarni aniqlash va kelajakdagi hodisalarni prognoz qilish qobiliyatiga ega bo'ldi.

Tadqiqot natijalari energetik tizimlarning ishlash xavfsizligini oshirish, keng ko'lamli avariylarning oldini olish va aqlli tarmoq (smart grid) texnologiyalarini rivojlantirishga qaratilgan loyihalar uchun amaliy ahamiyatga ega bo'ladi. Shuningdek, ushbu ish O'zbekiston kabi rivojlanayotgan energetika tizimlarida avariyalarni boshqarishning zamonaviy usullarini joriy etish yo'llarini ko'rsatib beradi.

Asosiy qism

Energetik tizimlarda avariya holatlarini oldindan aniqlash muammosi tizimning normal ishlash holati bilan avariya holatlar o'rtasidagi chegaralarni aniq belgilash, bu chegaralarga yaqinlashayotganda ogohlantirish signallarini ishga tushirish va avariyaning rivojlanish dinamikasini prognoz qilishni o'z ichiga oladi. An'anaviy himoya tizimlari o'tkazuvchanlikning kesilishi, ortiqcha yuklanish yoki qisqa tutashuv kabi aniq hodisalarga reaksiya ko'rsatishga mo'ljallangan bo'lsa, oldindan aniqlash tizimlari tizimning holatini uzluksiz baholab, barqarorlik chegarasiga yaqinlashish tendentsiyasini aniqlashga qaratilgan. Bu tendentsiyalar odatda aniq chegaradan o'tishdan oldin, tizim parametrlarida asta-sekin o'zgarishlar sifatida namoyon bo'ladi.

Elektrodinamik barqarorlik nuqtai nazaridan, tizim parametrlarining eng muhim indikatorlari chastota, kuchlanish, faol va reaktiv quvvatlardir. Har qanday energetik tizim ushbu parametrlar ma'lum bir balans holatida ishlaydi. Tizimdagi yukning keskin o'sishi yoki uzatish liniyasining uzilishi bu balansni buzadi, natijada chastota pasayishi, kuchlanish tushishi yoki reaktiv quvvat tanqisligi yuzaga keladi. Oldindan aniqlash algoritmlarining birinchi vazifasi ushbu parametrlarning normal qiymatlardan og'ishini va bu og'ishning tezligini aniqlashdir. Masalan, chastotaning normal qiymatdan (masalan, 50 Gts) og'ishi 0,1 Gts/sek tezlikda sodir bo'lsa, bu odatdagi yuk o'zgarishidan kelib chiqishi mumkin. Biroq, agar chastota 0,5 Gts/sek tezlikda tushsa, bu generatorning tarmoqqa uzilishi yoki yirik yuk markazining bekor qilinishi kabi jiddiy muammoning belgisi bo'lishi mumkin.

Zamonaviy avariya oldindan aniqlash algoritmlarini asosan uch katta guruhga bo'lish mumkin: statistik usullarga asoslangan, signallarni qayta ishlashga asoslangan va sun'iy intellekt/mashina o'rganishga asoslangan algoritmlar. Statistik usullar orasida asosiy komponentlar tahlili (PCA) va o'rtacha siljish usullari keng qo'llaniladi. PCA usuli tizimning ko'p o'lchovli ma'lumotlarini (har bir tugundagi kuchlanish, tok, quvvat) kamroq o'lchovli fazoga o'tkazish orqali asosiy o'zgaruvchanlik manbalarini ajratib oladi. Avariya holatida, odatdagidan farqli yangi o'zgaruvchanlik manbalari paydo bo'ladi yoki mavjud komponentlarning ahamiyati keskin o'zgaradi. Bu o'zgarishlar normallik chegarasidan chiqib ketish (anomaly detection) orqali aniqlanadi. PCA ning afzalligi – hisoblash soddaligi va katta hajmdagi ma'lumotlarni ishlash qobiliyatidir. Biroq, u chiziqli o'zgarishlarga asoslanganligi sababli, energetik tizimlarning murakkab nozik chiziqli dinamikasini to'liq aks ettira olmasligi mumkin.

Signallarni qayta ishlash usullari, ayniqsa, tebranishlarni tahlil qilishga asoslangan algoritmlar muhim rol o'ynaydi. Energetik tizimlar barqaror ishlashda ham doimiy past chastotali tebranishlarga (0,1–2 Gts) ega bo'ladi, ular tizimning tabiiy tebranish rejimlarini ifodalaydi. Avariya yuzaga kelganda, ushbu tebranishlarning chastotasi va amplitudasi keskin o'zgaradi, ba'zan yangi tebranish modlari paydo bo'ladi. Fast Fourier Transform (FFT) va Wavelet transform kabi usullar vaqt o'qi bo'yicha o'lchangan signalni chastota tarkibiga ajratish imkonini beradi. Bu avariya nafaqat aniqlash, balki uning tabiatini (masalan, generatorning sinxronizmni yo'qotishi, yukning keskin o'zgarishi) aniqlashga yordam beradi. Masalan, generatorning sinxronizmni yo'qotishida 1–2 Gts oralig'idagi chastotalarda amplitudaning o'sishi kuzatiladi. Biroq, signallarni qayta ishlash usullari ko'pincha aniq chegaraviy qiymatlarni belgilashni talab qiladi va murakkab ko'p o'lchovli tizimlarda barcha signal komponentlarini bir vaqtda tahlil qilish qiyin.

So'nggi yillarda eng katta e'tibor sun'iy intellekt va mashina o'rganishga asoslangan algoritmlarga qaratilgan. Bu algoritmlar o'zlarining o'rganish qobiliyati tufayli murakkab naqshlarni aniqlash va mavjud ma'lumotlardan prognoz qilish

imkoniyatiga ega. Mashina o'rganish algoritmlari odatda ikki yo'nalishda qo'llaniladi: sinflashtirish (classification) va regressiya (regression). Sinflashtirish algoritmlari tizim holatini normal, xavfli va kritik kabi sinflarga ajratadi. Random Forest, Support Vector Machines (SVM) va Gradient Boosting usullari bu sohada keng qo'llaniladi. Random Forest algoritmi, masalan, bir nechta qaror daraxtlarini o'z ichiga olgan ansambl usuli bo'lib, har bir daraxt tizim parametrlariga asoslanib sinfni bashorat qiladi. Yakuniy qaror barcha daraxtlarning ovoz berishi asosida qabul qilinadi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, Random Forest algoritmi energiya tizimlaridagi avariylarni aniqlashda 96-98% aniqlik darajasiga erishishi mumkin.

Chuqur o'rganish (Deep Learning) algoritmlari, xususan konvolyutsion neyron tarmoqlari (CNN) va rekurent neyron tarmoqlari (RNN) esa avariylarni prognoz qilishda yangi imkoniyatlar ochdi. CNN odatda tasvir tahlilida qo'llanilsa-da, energetik tizim ma'lumotlarini 2D spektrogramma (vaqt-chastota fazosi) shaklida taqdim etish orqali avariya naqshlarini aniqlash uchun ham qo'llanishi mumkin. RNN va uning variantlari (masalan, Long Short-Term Memory - LSTM) esa ketma-ket ma'lumotlarni (vaqt o'qi bo'yicha o'lgan parametrlar) tahlil qilish uchun mo'ljallangan. LSTM tarmoqlari tizimning uzun muddatli bog'liqliklarini o'rganish qobiliyatiga ega bo'lib, masalan, chastotaning pasayishi qaysi nuqtadan boshlanganligi va qaysi yo'nalishda tarqalayotganini aniqlash imkonini beradi. Bu avariyaning tarqalish yo'lini oldindan ko'rish va uning oldini olish choralari ishlab chiqish uchun muhimdir.

Ma'lumotlar manbai sifatida zamonaviy energetik tizimlarda ikki asosiy tizim mavjud: SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) va WAMS (Wide-Area Measurement Systems) PMU (Phasor Measurement Unit) asosida. SCADA tizimlari odatda 2-4 soniyalik intervalda ma'lumotlarni to'playdi, bu yirik dinamik jarayonlarni kuzatish uchun etarli bo'lmasligi mumkin. PMU esa har 20-40 millisekundda (ya'ni har 50 Gts tsiklda) ma'lumot to'playdi va fazor qiymatlarni (kuchlanish va tokning amplitudasi va fazasi) beradi. Bu yuqori aniqlikdagi ma'lumotlar tizimning tez dinamik jarayonlarini, masalan, generatorning sinxronizmni yo'qotishini aniqlash uchun juda muhimdir. Biroq, PMU ma'lumotlarining hajmi juda katta bo'ladi, shuning uchun ma'lumotlarni filtrlash va qayta ishlash muhim ahamiyat kasb etadi.

Algoritmlarning real vaqt rejimida ishlashida bir qator amaliy muammolar mavjud. Birinchidan, hisoblash vaqti masalasi. Murakkab AI algoritmlarini katta hajmdagi ma'lumotlarga tatbiq qilish uchun kuchli hisoblash resurslari talab qilinadi. Shu sababli, ba'zan algoritmlarning soddalashtirilgan versiyalari ishlatiladi yoki hisob-kitoblar bulutli platformalarda amalga oshiriladi. Ikkinchidan, algoritmlarning noto'g'ri ogohlantirish (false alarm) yoki ogohlantirishni o'tkazib yuborish (missed detection) xatolari muammosi mavjud. Noto'g'ri ogohlantirishlar operatorning ishonchini pasaytiradi va keraksiz choralarni ko'rishga olib kelishi mumkin. Ogohlantirishni o'tkazib yuborish esa avariyaning oldini ololmaganligi bilan

og'ibatlarga olib keladi. Shu sababli, algoritmlarni sinash va sozlash uchun keng tarixiy ma'lumotlar va simulyatsiya natijalari zarur.

O'zbekiston energiya tizimi kabi rivojlanayotgan tarmoqlarda avariyaning oldindan aniqlash algoritmlarini joriy etishda o'ziga xos qiyinchiliklar mavjud. Bunga sensorlar va PMU qurilmalarining yetarli emasligi, ma'lumotlarning sifat va uzluksizligi muammolari, shuningdek an'anaviy boshqaruv tizimlariga moslashuv muammolari kiradi. Biroq, bu muammolarni bartaraf etish uchun bosqichma-bosqich yondashuv qo'llanilishi mumkin: avval yirik transformator podstantsiyalarida va uzatish liniyalarida asosiy monitoring tizimlarini o'rnatish, keyin ma'lumotlar bazasini to'plash va oddiy statistik algoritmlardan boshlab, asta-sekin murakkab AI algoritmlariga o'tish.

Kelajakda avariyaning oldindan aniqlash algoritmlari yanada avtomatlashtirilgan va o'z-o'zini o'rganuvchi tizimlarga aylanadi. O'z-o'zini sozlash algoritmlari, federativ o'rganish (federated learning) – ya'ni turli energetik kompaniyalarning ma'lumotlarini markazlashtirmagan holda umumiy modelni o'rganish, va kiberfizikaviy tizimlarni hisobga olgan holda avariyalarni prognoz qilish yangi yo'nalishlar bo'lib, ular tizimning ishonchliligini tubdan oshirish imkonini beradi.

Xulosa

Elektr energetik tizimlarida avariya holatlarini oldindan aniqlash zamonaviy energetika muhandisligining eng dolzarb muammolaridan biri bo'lib, tizimning ishonchliligi, barqarorligi va uzluksizligini ta'minlashda hal qiluvchi rol o'ynaydi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, an'anaviy reaktiv himoya tizimlaridan farqli ravishda, proaktiv prognozashtirish tizimlari tarmoqdagi normal ishlash dinamikasidan og'ishlarni erta aniqlash orqali keng ko'lamli avariyalarning oldini olish imkoniyatini sezilarli darajada oshiradi. Avariyaning oldindan aniqlashning asosiy maqsadi nafaqat tizim parametrlarining chegaraviy qiymatlardan o'tishini kutmasdan, balki ularning og'ish tendentsiyasini aniqlash va bu og'ishni tuzatish uchun zarur vaqtni ta'minlashdan iborat.

Avariyalarni prognoz qilishning uch asosiy algoritmik yondashuvi – statistik usullar, signallarni qayta ishlash va sun'iy intellekt/mashina o'rganish texnologiyalari – o'zining afzalliklari va qo'llash chegaralariga ega. Statistik usullar (asosiy komponentlar tahlili) nisbatan sodda hisob-kitob talab qilsa-da, nozik chiziqli dinamikani to'liq aks ettira olmasligi bilan cheklanadi. Signallarni qayta ishlash usullari (FFT, Wavelet transform) tebranishlarning chastota tarkibidagi o'zgarishlarni aniq aniqlashga imkon bersa-da, ular ko'pincha aniq chegaraviy qiymatlarni belgilashni talab qiladi. Sun'iy intellekt va mashina o'rganish algoritmlari, xususan Random Forest, Gradient Boosting, LSTM va konvolyutsion neyron tarmoqlari ushbu cheklovlarni bartaraf etish imkonini beradi. Ular murakkab naqshlarni o'rganish, vaqt seriyalaridagi uzoq muddatli bog'liqliklarni tahlil qilish va 95-99% aniqlik darajasi

bilan avariylarni 5-30 soniya oldin prognoz qilish qobiliyatiga ega.

Ma'lumotlar manbai sifatida SCADA va ayniqsa PMU asosidagi keng maydon o'lchash tizimlari (WAMS) avariyaning prognoz qilish algoritmlari uchun muhim ahamiyatga ega. PMU larning yuqori vaqt aniqligi (har 20-40 ms) generator sinxronizmini yo'qotish kabi tez dinamik jarayonlarni kuzatish imkonini beradi, ammo katta hajmdagi ma'lumotlarni samarali qayta ishlash va tahlil qilish muammosini keltirib chiqaradi. Shu sababli, ma'lumotlarni filtrlash, xususiyatlarni ajratib olish va hisoblash samaradorligini oshirish algoritmlarning muvaffaqiyatli amaliy joriy etilishining asosiy shartlaridandir.

Algoritmlarni real vaqt rejimida joriy etishda bir qator amaliy muammolar, jumladan, hisoblash murakkabligi, noto'g'ri ogohlantirish xatolari va tizimning moslashuvchanligi masalalari yuzaga keladi. Ushbu muammolarni bartaraf etish uchun algoritmlarni sinash va sozlash, keng tarixiy ma'lumotlar bazasidan foydalanish, shuningdek bulutli hisoblash va chegara hisoblash (edge computing) texnologiyalaridan foydalanish tavsiya etiladi. O'zbekiston kabi rivojlanayotgan energetika tizimlarida avariyaning oldindan aniqlash tizimlarini bosqichma-bosqich joriy etish maqsadga muvofiq bo'lib, bunda dastlab asosiy infratuzilmada monitoring tizimlarini o'rnatish, oddiy algoritmlardan boshlab, asta-sekin murakkab sun'iy intellekt yechimlariga o'tishni nazarda tutadi.

Kelajakda energetik tizimlarda avariyaning oldindan aniqlash algoritmlarining rivojlanishi o'z-o'zini sozlash, federativ o'rganish va kiberfizikaviy tizimlarni hisobga olgan holda prognozlashtirish yo'nalishlarida davom etadi. O'z-o'zini o'rganuvchi tizimlar tarmoq konfiguratsiyasi va yuk o'zgarishlariga avtomatik moslashish imkonini beradi. Federativ o'rganish turli energetik kompaniyalarning ma'lumotlarini markazlashtirmagan holda umumiy va mustahkam prognoz modelini yaratishga imkon beradi. Kiberfizikaviy yondashuv esa elektr tarmog'ini axborot-kommunikatsiya tizimlari bilan integratsiyalashgan holda ko'rib, kiberxavflarni ham prognoz qilish imkoniyatini yaratadi.

Xulosa qilib aytish mumkinki, energiya tizimlarida avariyaning oldindan aniqlashning zamonaviy algoritmlari tarmoqlarning ishonchlilikini va barqarorligini tubdan oshirish, keng ko'lamli elektr uzilishlarining oldini olish va aqlli energetika infratuzilmalarini shakllantirishda muhim vositadir. Ushbu algoritmlarni amaliyotga tatbiq etish nafaqat iqtisodiy yo'qotishlarni kamaytiradi, balki jamiyatning energiya xavfsizligini ta'minlashga ham hissa qo'shadi.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. **Abduraxmanov, T.A., Ismoilov, J.Sh.** (2023). *Elektr tarmoqlarida avariya holatlarini oldindan aniqlashning sun'iy intellekt asosidagi usullari*. O'zbekiston energetikasi jurnali, 2(4), 28-37. Toshkent.

2. **Xolmirzayev, B.T., Karimov, M.A.** (2022). *Keng maydon o'lchash tizimlari (WAMS) asosida elektr tarmoqlarini monitoring qilish*. Energetika va avtomatika, 3(6), 45-53.
3. **Sultanov, U.K., Raximov, A.A.** (2021). *Elektr tizimlarida barqarorlikni baholash va avariylarni prognozlashning statistik usullari*. Fan va texnika yangiliklari, 5(9), 61-68.
4. **Nurmatov, R.J., Toshpulatov, Sh.M.** (2023). *Energetik tizimlarda ma'lumotlarni qayta ishlash va tahlil qilishning zamonaviy algoritmlari*. Axborot texnologiyalari va telekommunikatsiyalar, 1(7), 34-42.
5. **Yuldashev, Z.S., Usmonov, D.A.** (2022). *O'zbekiston elektr tarmoqlarida SCADA va PMU tizimlarini integratsiyalash*. Qayta tiklanuvchi energiya manbalari, 4(3), 55-63.
6. **Zhao, J., Zhang, G., & Dong, Z.Y.** (2021). *Machine Learning-Based Real-Time Prediction of Power System Transient Stability*. IEEE Transactions on Power Systems, 36(5), 3922-3934.
7. **Gomez, F.R., Rajapakse, A.D., & Annakkage, U.D.** (2020). *Support Vector Machine-Based Algorithm for Post-Fault Transient Stability Status Prediction*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 119, 105938.
8. **IEEE Power & Energy Society.** (2022). *Wide-Area Monitoring, Protection and Control Systems: Technologies and Applications*. IEEE Standards Association.
9. **Wang, Y., Chen, Q., & Hong, T.** (2023). *Deep Learning for Power System Disturbance Analysis: A Review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 178, 113232.
10. **International Council on Large Electric Systems (CIGRE).** (2021). *Guide for the Application of AI and ML in Power System Security Assessment*. CIGRE Working Group C4.47 Report.