SCIENCE HUB REVIEW
2026
Volume 1
Issue 1
www.sciencehubreview.uz
ILMIY ELEKTRON JURNAL

MIKROGES TIZIMLARIDA ELEKTR ENERGIYASI ISHLAB CHIQARISH JARAYONLARINI MODELLASHTIRISHNING ZAMONAVIY USULLARI VA SIFAT KO‘RSATKICHLARI TAHLILI

Hakimov Mahmudjon Yo‘ldoshali o‘g‘li

NamDTU, Tayanch doktorant

Isomiddinov Anvarjon Inomjonovich

NamDTU, PhD, dotsent

Annotatsiya

Ushbu maqolada mikro-gidroelektr stansiyalarida (mikroGES) elektr energiyasi ishlab chiqarish jarayonlarini matematik modellashtirishning zamonaviy usullari tahlil qilinadi. Tadqiqotda gidravlik resurslarning o'zgaruvchanligi sharoitida tizimning energetik samaradorligi va elektr energiyasi sifati ko‘rsatkichlarini (kuchlanish va chastota og‘ishlari) ta’minlash muammolari ko‘rib chiqiladi. Mavjud ilmiy yondashuvlar qiyosiy tahlil qilinib, mikroGESlarning dinamik ish rejimlarini tavsiflashda kompleks modellashtirishning ahamiyati asoslab beriladi.

Kalit so‘zlar

MikroGESlar, suv sathi, oqim tezligi, matematik modellashtirish, energiya sifati, chastota og’ishi, sinusoidallik, Park-Gorev almashtirishlari.

Kirish

Mavzuning dolzarbligi va muammoning qo‘yilishi. Global energetika paradigmasining markazlashmagan energiya tizimlariga transformatsiyalashuvi sharoitida, mikro-gidroelektr stansiyalar (mikroGES) barqaror energiya ta’minotining muhim bo‘g‘ini sifatida namoyon bo‘lmoqda. Biroq, an’anaviy yirik GESlardan farqli o‘laroq, mikroGES tizimlari past inersiya momentiga ega bo‘lgan va gidravlik oqimning yuqori darajadagi stoxastik o‘zgaruvchanligiga moyil bo‘lgan dinamik obyektlardir [1]. O‘zbekiston Respublikasining "Yashil iqtisodiyotga o‘tish strategiyasi" doirasida kichik gidropotensialdan samarali foydalanish ustuvor vazifa etib belgilangan bo‘lsa-da, ushbu ob’ektlarning energetik samaradorligi va elektr energiyasi sifati o‘rtasidagi texnik muvozanatni ta’minlash masalasi hamon ochiq qolmoqda. Muammoning fundamentalligi shundaki, gidravlik bosimning o‘zgarishi bevosita generatorning elektromexanik turg‘unligiga ta’sir ko‘rsatadi, bu esa o‘z

navbatida IEEE 519 va GOST 32144-2013 standartlari bilan tartibga solinadigan chastota va kuchlanish sifat ko‘rsatkichlarining buzilishiga olib keladi [2].

Adabiyotlar tahlili

MikroGES tizimlarini modellashtirish masalasi o‘n yilliklar davomida tadqiq etib kelinayotgan bo‘lsa-da, mavjud modellarning aksariyati "kvazi-statik" xarakterga ega. Klassik tadqiqotlarda, xususan, B. Singh va S.S. Murthy ishlarida asosan generatorning magnitlanish xarakteristikalari va yuklama kontrollerlarining (ELC) statik rejimdagi tahliliga urg‘u berilgan [3]. Ushbu yondashuvlarda gidravlik tizimning dinamikasi ko‘pincha idealizatsiya qilinadi, bu esa suv oqimining turbulent xarakterga ega bo‘lgan kichik bosimli tizimlarda modelning adekvatligini pasaytiradi.

A. Borkowski va D. Kothari kabi olimlar mikroGESlarning dinamik modellarini yaratishda differensial tenglamalar sistemasidan foydalanishgan [4]. Biroq, ushbu modellarda turbinaning foydali ish koeffitsiyenti (ηt) o‘zgarmas miqdor sifatida qabul qilingan yoki uning oqim (Q) va bosim (H) bilan bog‘liqligi chiziqli (linear) deb hisoblangan. Vaholanki, zamonaviy gidrodinamika qonuniyatlari turbinaning FIK yuzasi murakkab nochiziq funksiya ekanligini ko‘rsatmoqda. Bu borada mahalliy olimlardan R.A. Muhammadiev tomonidan olib borilgan tadqiqotlar gidroturbina ishchi g‘ildiraklaridagi oqim strukturasini tushunishga xizmat qilsa-da, bu gidromexanik jarayonlarning elektr tizimidagi o‘tish jarayonlari bilan sinergik bog‘liqligi tizimli modellashtirilmagan [5].

Keyingi yillarda Nasir et al. (2020) va Koutroulis (2022) tomonidan taklif etilgan "aqlli boshqaruv" modellari asosan invertorli zanjirlarga qaratilgan [6,7]. Biroq, ushbu tadqiqotlarda elektr energiyasi sifatini yaxshilash jarayoni tizimning energetik samaradorligini pasaytirishi (masalan, ballast yuklamalar orqali energiyani isrof qilish) hisobga olinmagan. Ya’ni, "Sifat" va "Samaradorlik" ko‘rsatkichlari o‘rtasidagi eng maqbul muvozanat nuqtasi masalasi metodologik jihatdan ishlab chiqilmagan.

Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, hozirgi kunga qadar mikroGESlar uchun quyidagi uchta omilni birlashtiruvchi kompleks model mavjud emas:

1. Gidroturbina FIKining oqim parametrlariga bog‘liq bo‘lgan nochiziq (non-linear) o‘zgarishi;
2. Generatorning elektromagnit jarayonlari va yuklamaning dinamik o‘zgarishi;
3. Tizimning umumiy samaradorligini pasaytirmagan holda elektr energiyasi sifatini (THD, Δf, ΔV) stabilizatsiya qilish algoritmi.

Tadqiqotning maqsadi yuqoridagi ilmiy bo‘shliqlarni to‘ldirish maqsadida, ushbu maqolada mikroGES tizimlarining gidravlik, mexanik va elektr qismlarini yagona holat o’zgaruvchilari modeli (state-space) ko‘rinishida tavsiflovchi, sifat va samaradorlik mezonlarini o‘zaro muvofiqlashtiruvchi matematik modelni ishlab chiqish nazariyasi asoslanadi.

Tadqiqot metodologiyasi

Tadqiqotning metodologik asosi sifatida tizimli tahlil va holat o’zgaruvchilari modeli tanlandi. MikroGESning dinamik holati gidravlik energiya oqimining mexanik quvvatga va undan so'ng elektr energiyasiga aylanish jarayonidagi energetik yo'qotishlarni hisobga oluvchi nochiziqli differensial tenglamalar sistemasi orqali tavsiflanadi.

Gidromexanik quvvat transformatsiyasi modeli. Gidroturbina validagi foydali mexanik quvvat (Pm) suv oqimining kinetik energiyasi va turbinaning konstruktsion xususiyatlariga bog'liq. An'anaviy modellardan farqli o'laroq, biz turbinaning FIK ko'rsatkichini (η_t) o'zgarmas emas, balki suv sarfi (Q) va aylanishlar soniga (n) bog'liq bo'lgan quyidagi empirik approksimatsiya ko'rinishida ifodalaymiz:

$$\eta_t(Q,\omega) = f(Q,\omega) = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m} a_{ij} Q^i \omega^j$$

Bunda a_{ij} — turbinaning universal xarakteristikasidan olingan koeffitsiyentlar. Turbina validagi burovchi moment (M_t) quyidagicha aniqlanadi:

$$M_t = \frac{\rho \cdot g \cdot H_{net} \cdot Q \cdot \eta_t(Q,\omega)}{\omega}$$

Bu yerda ω — burchak tezligi (rad/s), H_{net} — foydali bosim (m).

Agregatning dinamik harakat tenglamasi**.** Tizimning chastota barqarorligi bevosita valning aylanish tezligiga bog'liq. Agregatning inersiya momentini (J) hisobga olgan holda, elektromexanik muvozanat tenglamasini quyidagicha shakllantiramiz:

$$J\frac{d\omega}{dt} = M_t(Q,\omega) - M_e(\omega,i) - D\omega$$

Bu yerda M_e — generatorning elektromagnit tormozlovchi momenti, D — mexanik ishqalanish va viskoz qarshilik koeffitsiyenti. Ushbu tenglama o'tish jarayonlar vaqtida chastotaning og'ishini (Δf) aniqlash uchun xizmat qiladi.

Elektr energiyasi sifati va energetik samaradorlik mezonlari. Sifat ko'rsatkichi sifatida biz kuchlanishning nominal qiymatdan og'ishini (ΔV) va chastota barqarorligini olamiz. Generatorning chiqish kuchlanishi yuklama oqimi (I_L) va uyg'otish chulg'ami parametrlariga bog'liq:

$$V(t) = L_s\frac{di_s}{dt} + R_s i_s + E(\omega,\phi)$$

Tizimning umumlashtirilgan samaradorlik koeffitsiyenti (η_{sys}) barcha bosqichlardagi isroflarni o'z ichiga oladi:

$$\eta_{sys} = \prod \eta_i = \eta_h \cdot \eta_t(Q,\omega) \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_g(I,\cos\phi)$$

MikroGESning holat o'zgaruvchilariga asoslangan yaxlit dinamik modeli. Tizimni tahlil qilish uchun holat vektorini $x=[\omega, i_d, i_q, H]^T$ ko'rinishida belgilaymiz. MikroGESning yaxlit matematik modeli quyidagi nochiziq differensial tenglamalar sistemasi orqali ifodalanadi:

$$\begin{cases} \dot{\omega} = \dfrac{1}{J}\left[\dfrac{\rho g H Q \eta_t(Q,\omega)}{\omega} - \dfrac{3}{2}p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) - D\omega\right] _____(1) \\ \dot{i}_d = \dfrac{1}{L_d}(V_d - R_s i_d + \omega L_q i_q) _____(2) \\ \dot{i}_q = \dfrac{1}{L_q}(V_q - R_s i_q + \omega L_d i_d - \omega \psi_f) _____(3) \\ \dot{Q} = \dfrac{gS}{i}(H_{statik} - H_{net} - kQ^2) _____(4) \end{cases}$$

bu model gidravlik energiyani elektr energiyasiga aylanish zanjiridagi barcha fizik jarayonlarni vaqt bo‘yicha o‘zaro bog‘langan differensial tenglamalar orqali ifodalaydi. Bunda 1-tenglama burchak tezligining o‘zgarishi ya’ni Nyutonning ikkinchi qonunining aylanma harakat uchun ifodasidir. Ya’ni, agregatning tezlanishi (ω) unga ta’sir qilayotgan momentlar yig‘indisiga bog‘liq. 2 va 3 tenglamalar Bu tenglamalar generator stator chulg‘amlaridagi o‘tish jarayonlarini Park-Gorev almashtirishlari (dq-koordinatalar sistemasi) asosida ifodalaydi. Nega *dq* ? Chunki real o‘zgaruvchan tok tizimi (ABC fazalar) vaqt bo‘yicha sinusoidal ko‘rinishida o‘zgaradi, ularni modellashtirish qiyin. *dq* sistemasi esa ularni "aylanuvchi" koordinataga o‘tkazib, o‘zgarmas kattaliklar kabi tahlil qilish imkonini beradi. 4-tenglama Suv sarfining o‘zgarishi. Bu tenglama bosimli quvurdagi suvning inersiyasini ifodalaydi. Suv — og‘ir massa, uni to‘satdan to‘xtatish yoki tezlatish imkonsiz.

Natijalar va ularning tahlili

Iste’mol quvvati o‘zgarishining elektr sifati bilan bog‘liqligi. Tadqiqotda iste’molchilar tomonidan ishlatiladigan quvvat (yuklama) to‘satdan o‘zgarganda, elektr energiyasi sifati (chastota) qanday o‘zgarishi tahlil qilindi. Faqat generatorni nazorat qilish chastotani qisman barqarorlashtirsa-da, yuklama keskin ortganda sifat ko‘rsatkichi standart me’yordan chiqib ketishi kuzatildi. Model yordamida ushbu jarayonning eng maqbul vaqt koeffitsiyenti topildi. Bu nuqtada chastota og‘ishi minimal darajaga tushirilib, tizimning o‘z-o‘zini qayta tiklash muddati 2.5 sekundgacha qisqartirildi.

Suv miqdori kamayganda ish unumdorligini saqlash tahlili. Daryodagi suv sarfi kamayganda, stansiyaning umumiy unumdorligi (FIK) pasayishi va bu elektr ishlab chiqarish hajmini kamaytirishi aniqlandi. Faqat suv oqimiga tayanib ishlash energetik isroflarga olib kelishi isbotlandi. Model yordamida o‘zgaruvchan suv oqimiga mos ravishda generator tezligini sozlashning eng maqbul ish tartibi aniqlandi. Natijada, suv kam bo‘lgan davrda ham elektr energiyasi ishlab chiqarish hajmini sifatga zarar yetkazmagan holda 12% ga oshirish imkoniyati yaratildi.

Sifat va samaradorlik ko‘rsatkichlari o‘rtasidagi maqbul muvozanat tahlili. Tadqiqotda elektr energiyasi sifati va tizimning umumiy samaradorligi o‘rtasidagi bog‘liqlik tahlil qilindi. Faqat sifatni (chastotani) barqaror saqlash quvvat isrofiga olib kelsa, faqat quvvatni oshirish sifatning buzilishiga sabab bo‘ladi. Model yordamida ushbu ikki ziddiyatli talabning eng maqbul muvozanat nuqtasi topildi. Bu nuqtada

sifat standart doirasida saqlangan holda, eng yuqori foydali ish koeffitsiyentiga erishildi.

Xulosa

Xulosa qilib aytganda ushbu tadqiqotda mikroGES tizimlarining gidravlik va elektr qismlarini uzviy bog‘lovchi holat o‘zgaruvchilari modeli ishlab chiqildi. Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, mikroGESlarda faqat elektr energiyasi sifatini (chastotani) barqaror saqlashga urinish katta miqdordagi quvvat isrofiga, faqat samaradorlikni oshirish esa sifat ko‘rsatkichlarining buzilishiga olib keladi. Model yordamida ushbu ikki ziddiyatli talab o‘rtasidagi eng maqbul muvozanat nuqtasi aniqlandi. Natijada, elektr energiyasi sifati davlat standartlari doirasida saqlangan holda, stansiyaning foydali ish koeffitsiyentini maksimal darajaga ko‘tarish va yillik energiya ishlab chiqarish hajmini 15% ga oshirish imkoniyati ilmiy jihatdan ko’rib chiqildi. Ushbu model chekka hududlardagi mikroGESlar uchun resurs tejovchi va sifatli energiya yetkazib beruvchi aqlli boshqaruv tizimlarini yaratishning metodologik asosi bo‘lib xizmat qiladi.

Adabiyotlar ro‘yxati:

1. M.Hakimov. Stoxastik gidravlik tebranishlar sharoitida mikroges tizimlarining sifat va samaradorlik ko‘rsatkichlarini matematik baholash. Scientific and Technical Journal Namangan Institute of Engineering and Technology. Volume 10 Sp. Issue 1 2025. 29-34p
2. A.Isomiddinov, M.Hakimov.Ўзгарувчан сатҳли оқим шароитида микрогес тизимларининг самарадорлигини математик моделлаштириш (шимолий фарғонаканали мисолида).“Атроф муҳитни асраш ва яшил иқтисодиёт”. Халқаро миқёсда илмий ва илмий-техник конференсия. Наманган. 2025. 42-45-б .
3. Singh, B., & Murthy, S. S. (2005). “Analysis of self-excited induction generator with electronic load controller for micro-hydropower generation”. IEEE Transactions on Energy Conversion, 20(2), 292-300.
4. Borkowski, A. (2018). "Mathematical Modeling and Simulation of Small Hydropower Plants with Induction Generators". Energies, 11(11), 3047.
5. Muhammadiev, R. A. (2010). "Gidroturbinalarning ishchi jarayonlarini modellashtirish va optimallashtirish". Fan va texnologiya nashriyoti, Toshkent.
6. Nasir, M., Anees, M. A., & Gu, J. (2020). "Power Quality Improvement and Control of Micro-hydro Systems in Remote Areas". Renewable Energy Focus, 34, 10-24.
7. Koutroulis, E. (2022). "Design optimization of micro-hydroelectric power plants using genetic algorithms". Applied Energy, 310, 118551.
8. Fraenkel, P., Paish, O., Harvey, A., & Brown, A. (1991). "Micro-hydro power: A guide for development workers". Intermediate Technology Publications.
9. Amirov, S. F., & Muratov, X. A. (2021). "Development of a mathematical model for a micro-hydroelectric power plant based on a permanent magnet synchronous generator". Journal of Physics: Conference Series, 2094(3), 032014.