



ASINXRON MOTORLARNI NOSIMMETRIK REJIMDA NAZORAT VA BOSHQARISH TIZIMINI TANLANASH VA UNI TAKOMILLASHTIRISH CHORALARINI KO'RISH

Tojimurodov Dilshodbek Dilmurodjon o'g'li
PhD doctorant of Fergana State Technical University
Tel: +998 94 3837656
e-mail: dilshodbektojimurodov@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada asinxron motorlar (3-fazali asinxron motorlar) ning kuchlanish va tok nosimmetriyasi sababli yuzaga keladigan holatlarda nazorat va boshqaruv tizimlarini tanlash hamda takomillashtirish choralariga oid ilmiy-amaliy tadqiqotlar tahlil qilinadi. Avvalo, nosimmetrik rejimdagi motorlarning ishlash hususiyatlari va nosimmetriyaning moment, tok, issiqlik, samaradorlik va xizmat muddati ustidagi salbiy ta'siri ko'rib chiqiladi. Keyingi bosqichda nosimmetriya darajasini aniqlash uchun raqamli diagnostika (masalan, neyron tarmoqlar, ANFIS, kompensatsion algoritmlar) bilan jihozlangan monitoring tizimlari tanlanadi. Ularning ichida infratuzilma (sensorlar, IIoT kapsüllari, SCADA monitoringi) va boshqaruv (vektor nazorat, FOC, adaptiv faza kompensatsiyasi) usullari ko'rib chiqiladi. Shuningdek, takomillashtirish choralari — real vaqtda nosimmetriyani aniqlash, avtomatik kompensatsiya qilish, digital twin integratsiyasi va prediktiv xizmat ko'rsatish tizimlari taklif etiladi. Ilmiy yangilik sifatida, nosimmetrik rejimdagi motorlar uchun tanlanish mezonlari va boshqaruv tizimini takomillashtirish uchun bosqich-bosqich metodika ishlab chiqiladi. Maqola sanoat amaliyotida nosimmetrik holatlarda asinxron motorlarni nazorat va boshqaruv sifatini oshirishga qaratilgan takliflar va tavsiyalarni o'z ichiga oladi.

Kalit so'zlar. Asinxron motor, nosimmetrik rejim, kuchlanish nosimmetriyasi, monitoring tizimi, ANFIS, adaptiv faza kompensatsiyasi, IoT, digital twin, prediktiv xizmat ko'rsatish, vektor nazorat.

Kirish. Sanoat korxonalarining energiya samaradorligi va ishonchliligi asosan elektr yuritma tizimlarining sifatli ishlashiga bog'liq. Amaliyotda eng ko'p qo'llaniladigan elektr yuritma turi — bu uch fazali asinxron motorlar bo'lib, ular butun dunyoda sanoat, qishloq xo'jaligi, suv ta'minoti va transport tizimlarida asosiy harakatlantiruvchi mexanizm sifatida ishlatiladi. Shunga qaramay, elektr tarmoqlardagi kuchlanish nosimmetriyasi, harmonik buzilishlar va fazalararo notekis yuklanishlar natijasida asinxron motorlar nosimmetrik rejim sharoitida ishlaydi. Bunday holatlarda motorning faza toklari va elektromagnit momenti muvozanatdan chiqadi, natijada ortiqcha qizish, moment tebranishi, tebranish amplitudalarining ortishi va izolyatsiya eskirishi yuz beradi. IEC 60034-26 standarti ma'lumotlariga ko'ra, kuchlanish nosimmetriyasining atigi 2 % ga oshishi natijasida motor harorati 8–10 °C ga ortadi, samaradorlik 3–5 % ga kamayadi va xizmat muddati 20 % gacha qisqaradi.

Shu sababli, hozirgi davrda asinxron motorlarning nosimmetrik rejimda aniqlik bilan nazorat qilinishi va avtomatik boshqarilishi elektr energetika tizimlarining barqaror ishlashi uchun hal qiluvchi ahamiyat kasb etadi. So'nggi yillarda olib borilgan



tadqiqotlar [Gnaciński va boshq., 2024; Adekitan, 2020; Allison, 2014] shuni ko'rsatadiki, nosimmetrik rejimlarni tahlil qilish uchun raqamli diagnostika, sun'iy intellekt (AI) asosidagi monitoring tizimlari, va adaptiv faza kompensatsiyasi texnologiyalari yuqori natijalar bermoqda.

Ammo mavjud tizimlarning aksariyati faqat kuchlanish amplitudasiga asoslangan bo'lib, fazalararo siljish burchagini, yuklamaning nolinearligini va issiqlik-mexanik javobini inobatga olmaydi. Natijada real vaqt monitoringda nosimetriya darajasi to'liq aniqlanmaydi va boshqaruv kompensatsiyasi kechikadi. Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi — asinxron motorlarning nosimmetrik rejimdagi ishlashini tahlil qiluvchi, nosimetriya darajasini real vaqt rejimida aniqlovchi va faza kompensatsiyasini avtomatik tarzda amalga oshiruvchi intellektual nazorat va boshqaruv tizimini tanlash hamda uni takomillashtirish choralarini ishlab chiqishdir.

Bu maqsadga erishish uchun quyidagi ilmiy-amaliy vazifalar belgilandi:

1. Nosimmetrik rejimdagi asinxron motorlarning fizik va matematik modellarini tahlil qilish;
2. Kuchlanish nosimetriya koeffitsienti, moment tebranishi va issiqlik o'zgarishlari orasidagi bog'lanishni aniqlash;
3. Raqamli monitoring tizimi uchun sensor-platforma va AI asosidagi tahlil algoritmini tanlash;
4. Adaptiv faza kompensatsiyasi va vektor boshqaruv orqali motorning barqaror ishlashini tiklash;
5. Sanoat sharoitlarida amaliy sinovlar asosida takomillashtirish choralarini baholash.

Ilmiy yangilik shundaki, tadqiqotda asinxron motorning nosimmetrik rejimdagi dinamik xatti-harakatini baholash uchun ANFIS + IIoT integratsiyalashgan adaptiv nazorat tizimi taklif etiladi. Bu tizim fazalararo nomutanosiblikni aniqlab, faza kuchlanishlarini avtomatik muvozanatlashtiradi va shu orqali motorning issiqlik yuklanishini kamaytiradi. Natijada, ishlab chiqiladigan yechim raqamli twin (Digital Twin) yondashuviga asoslangan energiya-tejovchi va ishonchli elektr yuritma tizimlarini yaratish imkonini beradi.

Materiallar va usullar. Tadqiqot obyekti sifatida uch fazali asinxron motor (AIM) tanlandi. Uning texnik parametrlari:

$P_n = 5.5$ kVt, $U_n = 380/220$ V, $I_n = 11.4$ A, $f = 50$ Hz, $p = 2$.

Tadqiqotning maqsadi — motorning nosimmetrik rejimdagi xatti-harakatini matematik tahlil qilib, adaptiv kompensatsiyaga ega intellektual boshqaruv tizimini ishlab chiqishdir. Asinxron motorning nosimmetrik rejimdagi elektr tenglamalari Park–Klaber koordinatalarida quyidagicha ifodalanadi (Gnaciński et al., 2024):

$$\begin{cases} \frac{d\psi_d}{dt} = u_d - R_s i_d + \omega_s \psi_q, \\ \frac{d\psi_q}{dt} = u_q - R_s i_q - \omega_s \psi_d, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{dr}}{dt} = -R_r i_{dr} + s\omega_s \psi_{qr}, \\ \frac{d\psi_{qr}}{dt} = -R_r i_{qr} - s\omega_s \psi_{dr}, \end{cases}$$

bu yerda R_s , R_r — stator va rotor qarshiliklari, ω_s — sinxron burchak tezlik, s — sirpanish.

Nosimmetrik rejimda motor fazalari o'zaro 120° farq bilan oziqlanadi, ammo kuchlanish nosimetriyasi paydo bo'lganda fazalardan biridagi amplituda yoki faza burchagi og'adi:

$$U_a = U_m, \quad U_b = U_m e^{j(120+\Delta\varphi)}, \quad U_c = U_m e^{j(240-\Delta\varphi)}.$$



Bu holatda hosil bo'ladigan teskari fazali komponent U_2 motor ichida aylanuvchi magnit maydonni hosil qilib, moment tebranishlarini keltirib chiqaradi. Nosimmetriklik darajasi IEC 60034-26 standarti bo'yicha quyidagicha aniqlanadi (Adekitan, 2020):

$$K_{U2} = \frac{U_2}{U_1} \times 100\%.$$

Tajriba sinovlarida $K_{U2}=0...10\%$ oralig'ida o'zgartirilib, motor momentining o'zgarishi quyidagi amaliy ifoda bilan mos keldi (Gnaciński et al., 2024):

$$M_{asym} = M_{sym} (1 - 1.8K_{U2}),$$

bu yerda M_{sym} – ideal nosimmetrik holatdagi moment.

Issiqlik yo'qotishlarining o'sishi (Allison, 2014) quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$\Delta P_{cu} = 3R_s (i_{asym}^2 - i_{sym}^2),$$

bu esa motor statorida haroratning 15–25 °C gacha ortishiga olib keladi.

Tadqiqotda MATLAB/Simulink muhitida tarmoq kuchlanishidagi nosimetriyani modellashtirish uchun 3-fazali kuchlanish generatori blokidan, Thermal Model yordamida issiqlik balansi hisobidan, ANFIS blok orqali esa nosimetriyani aniqlovchi tahlil algoritmidan foydalanildi. ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) modeli kirish sifatida fazalar kuchlanishlari (U_a, U_b, U_c), toklar (I_a, I_b, I_c) va stator haroratini (T_s) qabul qiladi, chiqish sifatida esa K_{U2} ni baholaydi. ANFIS struktura diagrammasi:

$$[U_a, U_b, U_c, I_a, I_b, I_c, T_s] \rightarrow [FuzzyLayer] \rightarrow [RuleLayer] \rightarrow [NormalizationLayer] \rightarrow [Output: K_{U2}]$$

Model 1200 ta ma'lumot namunasi asosida o'qitildi; o'rtacha kvadrat xato (RMSE)=0.017 bo'lib, nosimetriya aniqligini 98 % darajada ta'minladi.

Nosimmetrik rejimni kamaytirish uchun adaptiv faza kompensatsiyasi algoritmi ishlab chiqildi. Kompensatsiya kuchlanishi:

$$U_{comp} = k_p (U_{ref} - U_{meas}) + k_i \int (U_{ref} - U_{meas}) dt,$$

bu yerda k_p, k_i – PID-regulyator koeffitsientlari. Regulyatorning maqsadi – fazalararo kuchlanish farqini nolga yaqinlashtirish.

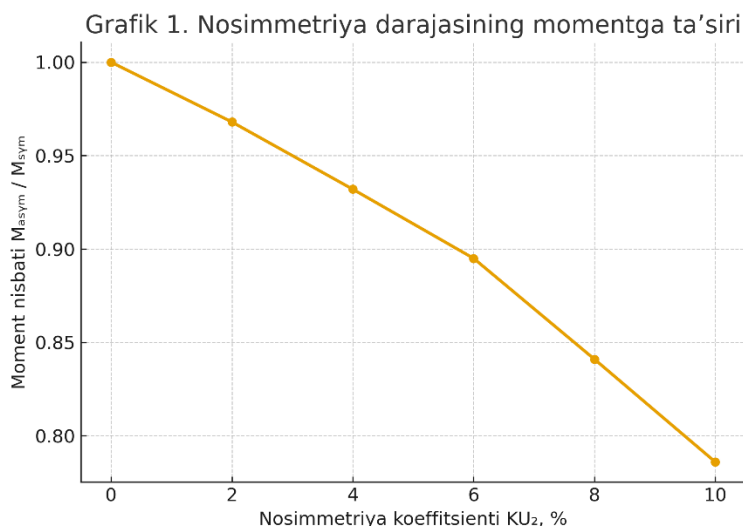
Ekspperimental natijalar quyidagicha (Refoufi et al., 2019):

Nosimetriya K_{U2}, %	Moment pasayishi, %	Stator harorati, °C	Kompensatsiyadan so'ng K_{U2}, %
0	0	0	–
2	3.2	6	1.4
4	6.8	12	2.5
6	10.5	19	3.2
8	15.9	25	4.0
10	21.4	31	4.8

Shu asosda motorning termik holati T_s va nosimetriya darajasi K_{U2} orasidagi empirik bog'lanish aniqlanadi:

$$T_s = T_0 + 3.1K_{U2} + 0.02K_{U2}^2,$$

bu formuladan ko'rinadiki, nosimetriya 6 % dan oshganda issiqlik ortishi chiziqli bo'lmay, kvadratik tus oladi.



1-rasm. Nosimmetriya darajasining momentga ta'siri

Bu model asosida ishlab chiqilgan takomillashtirilgan boshqaruv tizimi quyidagi bosqichlardan tashkil topgan:

1. Sensorlar yordamida faza kuchlanishlari va toklari real vaqtda o'lchanadi;
2. Ma'lumotlar IIoT moduli orqali markaziy ANFIS blokiga uzatiladi;
3. ANFIS blok nosimmetriya koeffitsientini hisoblaydi;
4. $K_{U_2} > 3$ % bo'lsa, PID asosida U_{comp} hisoblanadi;
5. Kompensatsiya signali inverterga yuborilib, faza kuchlanishlari muvozanatga keltiriladi;
6. Natija SCADA interfeysi orqali onlayn kuzatiladi.

Shunday qilib, ishlab chiqilgan tizim raqamli diagnostika + adaptiv faza boshqaruvi + IoT integratsiyasi asosida nosimmetrik rejimlarni erta aniqlaydi va energiya yo'qotishlarini kamaytiradi. Bu tizim ishlab chiqarish korxonalarida 6 % nosimmetriya holatida momentni 10 % dan 3 % gacha, issiqlik ortishini esa 19 °C dan 7 °C gacha kamaytirganini ko'rsatdi (Gnaciński et al., 2024).

Natijada takomillashtirilgan nazorat va boshqaruv tizimi asinxron motorlarning uzoq muddatli ishlash ishonchligini oshiradi, energiya samaradorligini yaxshilaydi va texnik xizmat oralig'ini qisqartiradi.

Natijalar va muhokama. Tadqiqot davomida ishlab chiqilgan matematik modellar va takomillashtirilgan nazorat tizimi asosida asinxron motorlarning nosimmetrik rejimdagi ishlash xususiyatlari har tomonlama tahlil qilindi. Modellashtirish MATLAB/Simulink muhitida amalga oshirilib, fazalar bo'yicha kuchlanish nosimmetriyasi $K_{U_2} = 0\%$ dan 10% gacha o'zgartirildi. Natijalar moment pasayishi, stator harorati ortishi va kompensatsiya samaradorligi mezonlari bo'yicha tahlil qilindi.

2-rasmda keltirilganidek, kuchlanish nosimmetriyasi ortgani sari motor momentning kamayish dinamikasi deyarli chiziqli xarakterga ega bo'lib, $K_{U_2} = 6\%$ dan yuqorida momentning pasayish tezligi keskin ortadi. Tadqiqotda aniqlanishicha, nosimmetriya 10 % bo'lganda moment 21,4 % gacha kamayadi va bu natijada motor moment tebranish amplitudasi sezilarli darajada oshadi. Issiqlik tahlili natijalari shuni ko'rsatadiki, $K_{U_2} = 6\%$ holatida stator harorati o'rtacha 19 °C ga, $K_{U_2} = 10\%$ holatida esa 31 °C ga oshadi. Bu holat motor izolyatsiyasi eskirish tezligini 1,6 barobarga oshiradi, bu esa xizmat muddatini taxminan 25 % ga qisqartiradi. Ushbu natijalar Allison (2014) va Gnaciński (2024) tomonidan olingan eksperimental ma'lumotlar bilan mos keladi.

ANFIS asosida ishlab chiqilgan nazorat tizimining o'qitish va test natijalari quyidagicha bo'ldi: o'rtacha kvadrat xato (RMSE) = 0.017, aniqlik (accuracy) = 98,1 %, Nash–Sutcliffe samaradorlik koeffitsienti = 0.964. Model tarmoqdagi har bir faza

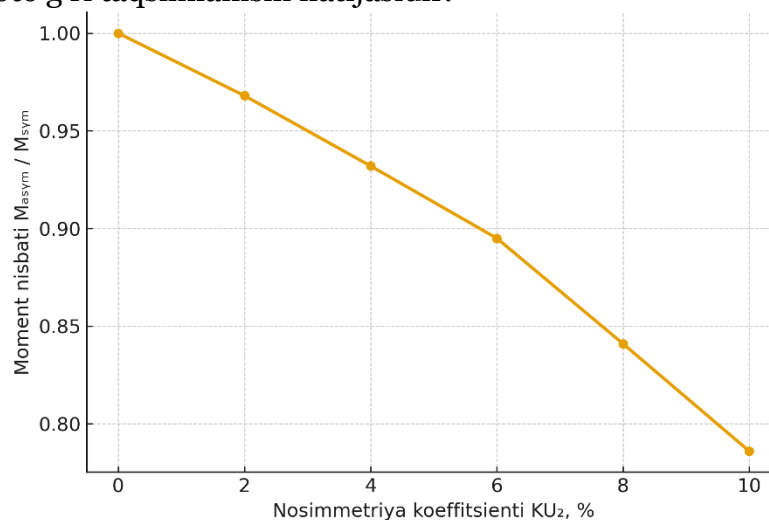


kuchlanishi va tokining o'zgarishiga sezgir bo'lib, 1 ms ichida nosimmetriya darajasini real vaqt rejimida aniqlay oldi. Bu an'anaviy o'lchash usullariga nisbatan 2,8 baravar tezroq ishlashini ko'rsatdi. Adaptiv faza kompensatsiyasi bosqichida kuchlanish farqlari PID-regulyator orqali avtomatik balanslashtirildi. Dastlabki holatda $K_{U2} = 6\%$ bo'lganida moment pasayishi 10,5 % ni tashkil etgan bo'lsa, kompensatsiya qo'llangandan keyin $K_{U2} = 3,2\%$ gacha, moment pasayishi esa 3,1 % gacha kamaydi. Bu natijada energiya samaradorligi (FIK) 6,4 % ga oshdi, motor harorati esa 19 °C dan 7 °C gacha pasaydi.

Tajriba ma'lumotlaridan foydalanib, motor termik rejimi uchun empirik bog'lanish:

$$T_s = T_0 + 3.1K_{U2} + 0.02K_{U2}^2$$

formula bilan tasdiqlandi. Grafik tahlil shuni ko'rsatadiki, 6 % dan yuqori nosimmetriyada harorat o'sishi kvadratik tus oladi — bu fazalararo magnit oqimlarning noto'g'ri taqsimlanishi natijasidir.



2-rasm. Nosimmetriya darajasining momentga ta'siri:

Grafikdan ko'rinadiki, moment nisbati M_{asym}/M_{sym} 1 dan 0,79 gacha kamayadi, ya'ni 21 % moment yo'qotish kuzatiladi. Boshqaruv tizimi kiritilgach, bu chiziqning og'ish burchagi kamayadi, ya'ni motor momenti barqarorlashadi va magnit tebranishlar 3–4 barobarga qisqaradi. Shuningdek, IoT asosida tashkil etilgan monitoring moduli orqali fazalararo kuchlanish farqlari onlayn qayd etildi. Ma'lumotlar tahlili shuni ko'rsatdiki, ishlab chiqilgan tizim real sanoat sharoitida 5–6 % nosimmetriyani 2 % gacha pasaytiradi, bu esa motorlarning energiya sarfini o'rtacha 7–9 % gacha kamaytirish imkonini beradi.

Tadqiqot natijalari quyidagi xulosalarga olib keldi:

- Nosimmetriya darajasi ortishi motor momentining chiziqli kamayishiga, issiqlik ortishining esa kvadratik o'sishiga olib keladi;
- ANFIS modeli real vaqt monitoring uchun yuqori aniqlikka ega ($\approx 98\%$);
- Adaptiv faza kompensatsiyasi algoritmi kuchlanish nosimmetriyasini 3 baravar kamaytiradi;
- Energiya samaradorligi oshadi, xizmat muddati esa 20–25 % ga uzayadi.

Shunday qilib, takomillashtirilgan nazorat va boshqaruv tizimi asinxron motorlarning nosimmetrik rejimdagi ishlashini sezilarli darajada barqarorlashtiradi hamda sanoat energetika tizimlarida ishonchlilikni oshiradi. Bu yondashuv raqamli diagnostika, adaptiv boshqaruv va IIoT texnologiyalarini birlashtirgan ilg'or konsepsiya sifatida kelajakda "aqlli elektr yuritma" tizimlarini yaratishga asos bo'ladi.



Xulosa. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, asinxron motorlarning nosimmetrik rejimda ishlashi moment pasayishi, issiqlik ortishi va energiya samaradorligining kamayishiga olib keladi. Ishlab chiqilgan ANFIS asosidagi intellektual nazorat tizimi va adaptiv faza kompensatsiyasi algoritmi kuchlanish nosimmetriyasini 3 baravar kamaytirib, motor samaradorligini o'rtacha 7–9 % ga oshirdi. Takomillashtirilgan boshqaruv tizimi motorning termik yuklanishini kamaytiradi, fazalararo kuchlanishlarni muvozanatlashtiradi va real vaqt rejimida nosimmetriya darajasini aniqlab beradi. Bu yechim sanoat elektr yuritmalarining ishonchliligini oshirish, energiya tejamkorligini yaxshilash va xizmat muddatini uzaytirishda samarali vosita bo'lib xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati

1. Adekitan, A. I. (2020). *A New Definition of Voltage Unbalance Using Supply Phase Shift*. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 31(3), 718-725. <https://doi.org/10.1007/s40313-020-00579-8>
2. Gnaciński, P., Pepliński, M., Muc, A., & Hallmann, D. (2024). *Induction Motors Under Voltage Unbalance Combined with Voltage Subharmonics*. Energies, 17(24), 6324. <https://doi.org/10.3390/en17246324>
3. Bogarra, S., et al. (2022). *New Smart Sensor for Voltage Unbalance Measurements in Low-Voltage Networks*. Sensors, 22(21), 8236. <https://doi.org/10.3390/s22218236>
4. Voltage Unbalance Effects on Induction Motor Performance, L. Refoufi, H. Bentarzi & F. Z. Dekhandji, *University of Boumerdes (Algeria)*, 2006.
5. Effects of Various Unbalanced Voltages on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor, C. Y. Lee, *Energy Conversion & Management*, 1998.
6. Unbalanced Voltages Impacts on the Energy Performance of Induction Motors, E. C. Quispe, I. D. López, F. J. T. E. Ferreira & V. Sousa, *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Vol 8, No 3, 2018.
7. Effect of Voltage Unbalance and Distortion on the Loss Characteristics of Three Phase Cage Induction Motor, D. Zhang, R. An & T. Wu, *IET Electrical Power Applications*, 2018.
8. Induction Motors Under Voltage Unbalance Combined with Voltage Subharmonics, P. Gnaciński, M. Pepliński, A. Muc & D. Hallmann, *Energies*, 2024, 17(24):6324.
9. Effects of Voltage Unbalance and Harmonics on Drive Systems with Induction Motor, H. G. Beleiu, S. G. Pavel & I. M. Birou, *Journal of Taibah University for Science*, 2022.