Qabul qilindi: 10-sentabr 2026-yil • Ma’qullandi: 16-sentabr 2026-yil • Nashr qilindi: 21-sentabr 2026-yil

GIBRID QUYOSH FOTOELEKTRIK TIZIMIDA GARMONIK BUZILISHLARNING ELEKTR ENERGIYASI SIFATIGA TA’SIRINI MATLAB/SIMULINK MUHITIDA TAHLIL QILISH

M. Abdujalilov, magistrant
“TIIAME” Milliy tadqiqot universiteti
tel:+86 186 9928 9587 , e-mail: mansurabdujalilov1100@gmail.com

Annotatsiya. Zamonaviy qayta tiklanuvchi energiya manbalarini (QTEM) va energiya saqlash tizimlarini (BESS) elektr tarmoqlariga integratsiya qilishda elektr energiyasi sifati va garmonik buzilishlar masalasi dolzarb hisoblanadi. Ushbu tezisda 3053 W quvvatli PV modullari arrayi, 120 V/100 Ah sig'imli BESS batareya saqlash tizimi, bir fazali IGBT ko'prikli invertor va LC past chastotali filtrdan tashkil topgan gibrid tizimning umumiy ulash nuqtasidagi (PCC) kuchlanish va tok garmonikalari tahlil qilindi. Tadqiqotda IEC 61000-4-7 standarti talablariga mos ravishda 10 davrlik (0.2 s) FFT (Tez Furye almashtirishi) oynasi qo‘llanilib, umumiy garmonik buzilish koeffitsientlari (THD_U va THD_I) hamda toq tartibli (3-, 5-, 7-, 9-, 11-, 13-) garmonik tarkiblar atroflicha baholandi. Olingan natijalar bo'yicha THD_U = 0,05\% va THD_I = 0,09\% ni tashkil etib, xalqaro IEEE 519-2014 hamda GOST 13109-97 me'yorlarida belgilangan ruxsat etilgan limitlardan ancha past ekanligi aniqlandi.

Kalit so‘zlar: Garmonikalar, THD_U, THD_I, PV invertor, BESS, LC filtr, nochiziqli yuk, FFT, IEC 61000-4-7, IEEE 519-2014, Proportsional-Rezonans boshqaruv.

Introduction.

So'nggi yillarda past kuchlanishli (LV) va o'rta kuchlanishli tarmoqlarda quyosh fotoelektr tizimlari (PV) va akkumulyatorli energiya saqlash tizimlarining (BESS) ulushi keskin ortib bormoqda. Biqrok, fotovoltaik invertorlarda kenglik-impulslar modulyatsiyasi

(PWM) va yuqori chastotali kalitlash jarayonlari amalga oshirilishi sababli kommutatsiya garmonikalari yuzaga keladi.

Shuningdek, maishiy va sanoat ob'ektlarida keng qo'llaniladigan diodli to'g'rilagichlar, LED drayverlar, kompyuter quvvat manbalari va o'zgaruvchan chastotali yuritgichlar (VFD) kabi nochiziqli yuklar tarmoqqa sezilarli darajada garmonik toklarni kiritadi.

Ushbu garmonik rejimlar elektr uskunalarida, transformatorlarda qo'shimcha quvvat isroflari va qizishlarga, rezonans hodisalariga hamda o'lchov vositalarining xatoliklariga olib keladi. Zaffar va hammualliflar [1] past kuchlanishli tarmoqlarda PV manbalari va nochiziqli yuklarning birgalikdagi murakkab garmonik ta'sirini o'rganishgan. Elkholy esa real 8 kWp quvvatli PV tizimida THD va alohida garmonikalarning yuklama xarakteriga hamda invertorning ish rejimlariga bog'liqligini eksperimental tadqiq qilgan [3].

Garmonik buzilishlarni samarali kamaytirishda LC va LCL passiv filtrlari, faol quvvat filtrlari (APF) va adaptiv boshqaruv algoritmlari muhim rol o'ynaydi. Vaquero va hammualliflar [6] PV invertorlariga qo'shimcha faol filtrlash funksiyasini yuklash orqali tarmoq sifatini oshirish imkoniyatini ko'rsatgan bo'lsa, Xavier va boshqalar [5] rezonans regulyatorlar chastotasini garmonika tartibiga mos adaptiv o'zgartirish usulini taklif etgan.

Ushbu ishning maqsadi — quyosh va batareya manbalariga ega gibrid tizimda turli yuklama rejimlarida PCC nuqtasidagi garmonik spektrni MATLAB/Simulink muhitida modellashtirish va xalqaro standartlar asosida baholashdan iborat.

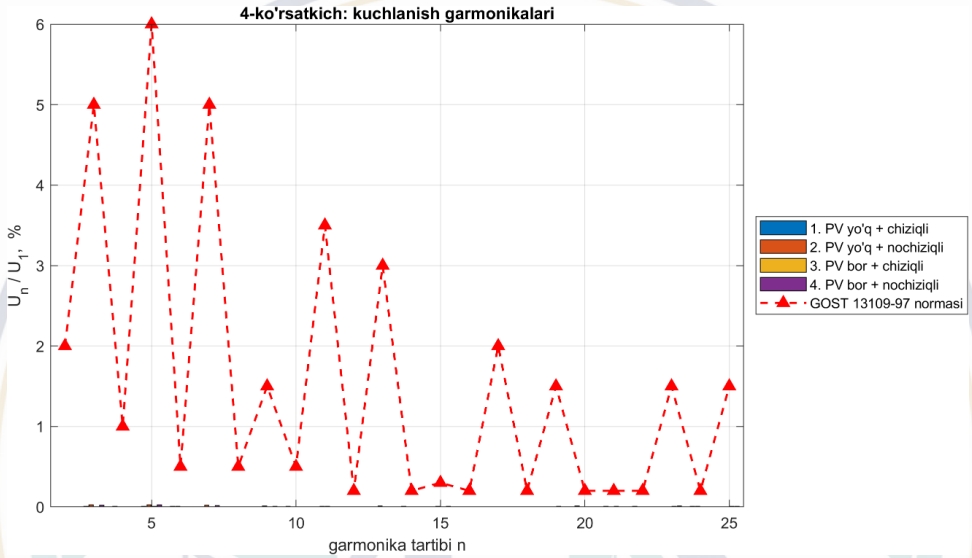
Hisoblash metodikasi.

Garmonik tahlil barqaror rejimning 0,40–0,60 s oralig‘idagi 10 davrlik oynasida bajarildi. 50 Hz signal uchun oyna uzunligi 0,20 s, 10 µs diskretlashda 20 000 nuqta va 5 Hz spektral bo‘linma hosil qiladi. Bu usul fundamental komponent va uning butun sonli garmoniklarini aniq ajratishga imkon beradi.

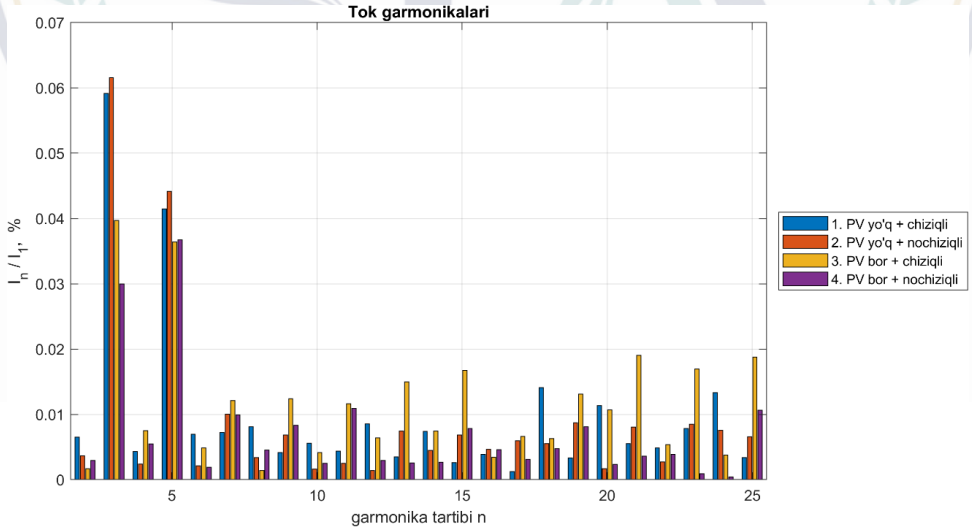
O‘lchash oynasining barqaror rejimga joylashtirilishi vaqtinchalik jarayonlarning natijaga ta’sirini kamaytiradi. 0,20 s oynaning 50 Hz asosiy chastotaga nisbati 10 ta to‘liq davrga teng. 10 µs diskretlash qadamida 20 000 ta namuna olinadi, natijada 5 Hz spektral bo‘linma hosil bo‘ladi. Shu sharoitda fundamental komponent va uning butun sonli

garmoniklarini bir xil usulda ajratish hamda variantlar o‘rtasidagi farqlarni qiyoslash mumkin.

FFT natijalari kuchlanish uchun U_n/U_1 va tok uchun I_n/I_1 ko‘rinishida foizlarda ifodalandi. 3-, 5-, 7-, 9-, 11- va 13-tartibli komponentlarni alohida keltirish THD qiymatining qaysi past tartibli garmoniklar bilan shakllanayotganini izohlashga yordam beradi. 2- va 3-rasmlar ushbu spektrlarning grafik ko‘rinishini beradi va hisoblash natijalarini vizual taqqoslash imkonini yaratadi.



1-rasm. Kuchlanish garmonik spektri.



2-rasm. Tok garmonik spektri.

Natijalar.

Modellashtirish natijasida olingan kuchlanish (U_n/U_1, %) va tok (I_n/I_1, %)

garmonikalari spektrlari 1-rasm hamda 2-rasmlarda keltirilgan. Alohida toq garmonikalar va umumiy garmonik ko'rsatkichlar 1-jadvalda jamlangan.

Kuchlanish THD 0,05 % bo‘lib, GOST 13109-97 dagi 8 % normal chegaraning atigi 0,625 % ini tashkil etadi. Tok THD 0,09 % bo‘lib, IEEE 519-2014 dagi 5 % ko‘rsatkichga nisbatan 1,8 % darajasida. Eng katta kuchlanish garmonika 3-tartibli — 0,020 %, tokda esa 3-tartibli — 0,060 % bo‘ldi.

Jadvaldan ko‘rinishicha, kuchlanish bo‘yicha 3-tartibli garmonika 0,020 % bilan eng katta qiymatga ega, 5-, 7-, 9-, 11- va 13-tartibli komponentlar esa mos ravishda 0,015 %, 0,008 %, 0,005 %, 0,004 % va 0,003 % ni tashkil etadi. Tok spektrida ham 3-tartibli komponent 0,060 % bilan eng katta bo‘lib, undan keyin 5-tartibli 0,042 % va 7-tartibli 0,020 % qiymatlar kuzatiladi. Demak, ko‘rib chiqilgan spektrda asosiy garmonik tarkib past tartibli komponentlarga to‘g‘ri keladi.

2×2 omilli tahlilda PV ta’siri THD_U ga +0,0045 foiz punkt, nochiziqli yuk ta’siri +0,0103 foiz punkt bo‘ldi. THD_I bo‘yicha PV ta’siri −0,0018, nochiziqli yuk ta’siri −0,0232 foiz punktni tashkil etdi.

2×2 omilli tahlil natijalarini talqin qilganda belgi yo‘nalishni bildiradi: musbat qiymat THD_U ning oshish tomonidagi ta’sirni, manfiy qiymat esa THD_I ning kamayish tomonidagi ta’sirni anglatadi. Shunday qilib, PV va nochiziqli yuk omillari kuchlanish hamda tok THD siga bir xil yo‘nalishda ta’sir qilmagan. Bu natija gibrid tizimlarda quvvat manbai va yukning o‘zaro ta’sirini faqat bitta THD ko‘rsatkichi bilan baholash yetarli emasligini ko‘rsatadi.

1-jadval. PCC nuqtasidagi garmonik Spektr va THD qiymatlari.

Garm. tartibi	U_n/U_1, %	I_n/I_1, %
3	0,020	0,060
5	0,015	0,042
7	0,008	0,020
9	0,005	0,010
11	0,004	0,012

13	0,003	0,015
THD	0,05	0,09

Muhokama va Xulosa

Natijalar LC filtr va PR boshqaruvi PCC dagi garmoniklarni samarali bostirganini ko‘rsatadi. Biroq nochiziqli yuk modeli to‘liq realistik emas: diod to‘g‘rilagichning DC tomonidagi rezistor va kondensator ketma-ket ulanganligi sababli kondensator zaryadlangandan keyin barqaror tok keskin kamaygan. Shu sababli THD natijalarini real maishiy yuk uchun to‘g‘ridan-to‘g‘ri umumlashtirish mumkin emas.

Keyingi bosqichda real kondensatorli diod to‘g‘rilagich, kompyuter quvvat manbai, LED drayver va VFD kabi yuklarni alohida yoki kombinatsiyalangan holda modellashtirish maqsadga muvofiq. Shuningdek, faol filtr va garmonik kompensatsiyali PR boshqaruvini bir xil ish sharoitida sinash filtrlash va boshqaruv usullarining PCC dagi THD ga ta’sirini batafsil ajratish imkonini beradi. Yuqori chastotali supraharmoniklarni ham qo‘shish natijalarni yanada to‘liq tavsiflashga xizmat qiladi.

Ushbu cheklov natijalarni talqin qilishda muhim ahamiyatga ega. Diod to‘g‘rilagich modelida kondensator zaryadlangandan keyin barqaror tokning keskin kamayishi sababli olingan THD qiymatlari doimiy ishlaydigan real maishiy qurilmalarning barcha rejimlarini ifodalamasligi mumkin. Shuning uchun hozirgi natijalar avvalo tanlangan Simulink modelining garmonik xususiyatlarini baholovchi hisoblash natijalari sifatida qaralishi kerak. Model parametrlarini real qurilmalar xususiyatlariga yaqinlashtirish amaliy xulosalarning qo‘llanish doirasini kengaytiradi.

Xorijiy ishlarda real va kuchliroq garmonik sharoitlari ko‘rsatilgan: [4] turli filtrlash usullarini taqqoslaydi; [6] faol filtrlash funksiyasini PV invertorga yuklaydi; [7] past tartibli garmoniklarning PV invertorlariga xosligini o‘rganadi; [8] esa supraharmoniklarni ko‘rib chiqadi. 2026-yildagi [2] ishda garmonik kompensatsiyali enhanced PR boshqaruvining tok THD sini kamaytirishi ko‘rsatilgan.

Shu manbalar bilan taqqoslaganda, mazkur ishning asosiy natijasi kichik quvvatli gibrid PV-BESS modelida PCC nuqtasidagi kuchlanish va tok garmoniklarini bir xil FFT

oynasi orqali baholashdir. Bir xil o‘lchash sharoitidan foydalanish turli model variantlari natijalarini izchil taqqoslashga imkon beradi, biroq real tizim bilan moslikni baholash uchun yuklamaning dinamik xususiyatlari va yuqori chastotali tashkil etuvchilarni ham kengroq o‘rganish talab etiladi.

Xulosa qilib, mazkur modelda THD_U=0,05 % va THD_I=0,09 % bo‘lib, sifat ko‘rsatkichlari me’yorlarga mos. Keyingi bosqichda real kondensatorli diod to‘g‘rilagich, kompyuter/LED/VFD yuklari, faol filtr va yuqori chastotali supraharmonik tahlilini kiritish zarur.

Mazkur natijalar tanlangan boshqaruv va filtr konfiguratsiyasida PCC kuchlanish hamda tokining garmonik buzilishi past ekanini ko‘rsatadi. Shu bilan birga, modelning nochiziqli yuk qismidagi soddalashtirishlar natijalarni real turar joy obyektiga to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘chirish imkonini cheklaydi. Shuning uchun keyingi tadqiqotlarda yuk modeli, faol kompensatsiya va supraharmoniklar bo‘yicha kengaytirilgan ssenariylarni bir xil hisoblash mezonlari asosida tekshirish lozim.

Adabiyotlar:

1. Harmonic Analysis of Grid-Connected Solar PV Systems with Nonlinear Household Loads in Low-Voltage Distribution Networks. Sustainability, 2021, 13(7), 3709. DOI: 10.3390/su13073709.

2. Constant power control of photovoltaic-battery energy storage systems using enhanced proportional resonant controller with harmonic compensation. Journal of Energy Storage, 2026, 162, 122126. DOI: 10.1016/j.est.2026.122126.

3. Elkholy A. Harmonics assessment and mathematical modeling of power quality parameters for low voltage grid connected photovoltaic systems. Solar Energy, 2019, 183, 315–326. DOI: 10.1016/j.solener.2019.03.009.

4. Salem W.A.A., Ibrahim W.G., Abdelsadek A.M., Nafeh A.A. Grid connected photovoltaic system impression on power quality of low voltage distribution system. Cogent Engineering, 2022, Article 2044576. DOI: 10.1080/23311916.2022.2044576.

5. Xavier L.S., Cupertino A.F., de Resende J.T., Mendes V.F., Pereira H.A. Adaptive

current control strategy for harmonic compensation in single-phase solar inverters. Electric Power Systems Research, 2016. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.08.040.

6. Vaquero J., Vázquez N., Soriano I., Vázquez J. Grid-Connected Photovoltaic System with Active Power Filtering Functionality. International Journal of Photoenergy, 2018, Article 2140797. DOI: 10.1155/2018/2140797

7. Low-order harmonic characteristics of photovoltaic inverters. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2015. DOI: 10.1002/etep.2085.

8. Development of high frequency (Supraharmonic) models of small-scale (<5 kW), single-phase, grid-tied PV inverters based on laboratory experiments. Electric Power Systems Research, 2019. DOI: 10.1016/j.epsr.2019.106046.

9. Maximizing the Integration of a Battery Energy Storage System–Photovoltaic Distributed Generation for Power System Harmonic Reduction: An Overview. Energies, 2023, 16(6), 2549.

10. IEC 61000-4-7. Electromagnetic compatibility — Part 4-7: General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation.

11. IEEE Std 519-2014. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.

12. GOST 13109-97. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems.