

Past kuchlanishli taqsimlovchi elektr tarmoqlarida filtr-kompensatsiya qurilmalarini genetik algoritmda asosida optimal tanlash

Abduraxim D. Taslimov¹, Feruz M. Raximov^{2, a}, Asliddin O. Norqulov²

¹) DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; <https://orcid.org/0000-0003-2856-6287>

^{2, a}) PhD, dots., Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Navoiy, 210100, O'zbekiston; feruz.raximov.2017@mail.ru <https://orcid.org/0009-0008-6832-0509>

²) Katta o'qituvchi., Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Navoiy, 210100, O'zbekiston; asliddin.norqulov.91@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-4521-8367>

Dolzarbli: hozirgi kunda 0,4 kV past kuchlanishli taqsimlovchi elektr tarmoqlarida nochiqli yuklamalar, jumladan yorug'lik diodli yoritgichlarning elektron quvvat manbalari, impulsli quvvat bloklari, chastota o'zgartirgichlar va boshqa elektron iste'molchilar ulushining ortishi natijasida garmonik buzilishlar darajasi oshib bormoqda. Buning natijasida kuchlanish nosinusoidaligi kuchayadi, neytral simdagi tok ortadi, transformator va kabel liniyalarida qo'shimcha quvvat yo'qotishlari yuzaga keladi hamda elektr energiyasi sifati yomonlashadi. Oddiy kompensatsiya qurilmalarini qo'llash har doim ham samarali natija bermaydi, ayrim hollarda esa rezonans hodisalarini keltirib chiqarishi mumkin. Shu sababli 0,4 kV tarmoqlarda garmonik buzilishlarni kamaytirish uchun filtr-kompensatsiya qurilmalarini optimal tanlash dolzarb ilmiy-amaliy masala hisoblanadi.

Maqsad: 0,4 kV taqsimlovchi elektr tarmoqlarida garmonik buzilishlarni kamaytirish, kuchlanishning umumiy garmonik buzilish koeffitsientini pasaytirish, aktiv quvvat yo'qotishlarini kamaytirish va elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlarini yaxshilash uchun filtr-kompensatsiya qurilmalarining optimal turi, quvvati hamda ulanish nuqtasini aniqlashdan iborat.

Usullar: tadqiqotda 0,4 kV radial taqsimlovchi elektr tarmog'ining matematik modeli tuzildi va undagi nochiqli yuklamalarning garmonik tarkibi hisobga olindi. Filtr-kompensatsiya qurilmalarini tanlash masalasini hal etishda asosiy usul sifatida genetik algoritmdan foydalanildi. Bunda qurilmaning turi, quvvati va ulanish nuqtasi maqsad funksiyasi asosida optimallashtirildi. Maqsad funksiyasiga kuchlanishning umumiy garmonik buzilish koeffitsienti, individual garmonikalar ulushi, aktiv quvvat yo'qotishlari va neytral sim toki kiritildi.

Natijalar: 0,4 kV taqsimlovchi elektr tarmoqlarida garmonik buzilishlarni kamaytirish masalasi 8 tugunli radial test sxemasi misolida tahlil qilindi. Nochiqli yuklamalar ta'sirida hosil bo'ladigan garmonik buzilishlarning tarmoq rejim ko'rsatkichlariga ta'sirini baholash natijalari keltirilgan. Filtr-kompensatsiya qurilmalarini genetik algoritmda tanlash orqali elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlarini yaxshilash imkoniyati aniqlangan.

Kalit so'zlar: 0,4 kV taqsimlovchi elektr tarmog'i, garmonik buzilishlar, filtr-kompensatsiya qurilmasi, genetik algoritmda, elektr energiyasi sifati, kuchlanish nosinusoidaligi, neytral o'tkazgich toki.

Оптимальный выбор фильтрокомпенсирующих устройств на основе генетического алгоритма в распределительных электрических сетях низкого напряжения

Абдурахим Д. Таслимов¹, Феруз М. Рахимов^{2, а}, Аслиддин О. Норкулов²

¹) DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; ataslimov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-2856-6287>

^{2, а}) PhD, доц., Навоийский государственный горно-технологический университет, Навои, 210100, Узбекистан; feruz.raximov.2017@mail.ru <https://orcid.org/0009-0008-6832-0509>

²) Старший преподаватель., Навоийский государственный горно-технологический университет, Навои, 210100, Узбекистан; asliddin.norqulov.91@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-4521-8367>

Актуальность: в настоящее время в распределительных электрических сетях низкого напряжения 0,4 кВ уровень гармонических искажений возрастает вследствие увеличения доли нелинейных нагрузок, включая электронные источники питания светодиодных осветительных устройств, импульсные блоки питания, преобразователи частоты и других электронных потребителей. В результате этого усиливается несинусоидальность напряжения, увеличивается ток в нейтральном проводнике, возникают дополнительные потери мощности в трансформаторах и кабельных линиях, а также ухудшаются показатели качества электрической энергии. Применение обычных компенсирующих устройств не всегда обеспечивает эффективный результат, а в отдельных случаях может приводить к возникновению резонансных явлений. В связи с этим оптимальный выбор фильтрокомпенсирующих устройств для снижения гармонических искажений в сетях 0,4 кВ является актуальной научно-практической задачей.

Цель: определение оптимального типа, мощности и точки подключения фильтрокомпенсирующих устройств для снижения гармонических искажений в распределительных электрических сетях 0,4 кВ,

For citation: Taslimov A.D., Raximov F.M., Norqulov A.O. Providing steady-state power systems containing large solar power plants. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 2, pp. 56-62.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.21185295>

Received: 12.12.2025

Revised: 15.04.2026

Accepted: 05.06.2026

Published: 26.06.2026

Copyright: © Abduraxim D. Taslimov, Feruz M. Raximov, Asliddin O. Norqulov, 2025. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

уменьшения суммарного коэффициента гармонических искажений напряжения, снижения активных потерь мощности и повышения показателей качества электрической энергии.

Методы: в исследовании была разработана математическая модель радиальной распределительной электрической сети 0,4 кВ с учетом гармонического состава нелинейных нагрузок. В качестве основного метода решения задачи выбора фильтрокомпенсирующих устройств использован генетический алгоритм. При этом тип устройства, его мощность и точка подключения оптимизировались на основе целевой функции. В целевую функцию были включены суммарный коэффициент гармонических искажений напряжения, доля отдельных гармоник, активные потери мощности и ток нейтрального проводника.

Результаты: задача снижения гармонических искажений в распределительных электрических сетях 0,4 кВ была проанализирована на примере 8-узловой радиальной тестовой схемы. Приведены результаты оценки влияния гармонических искажений, возникающих под воздействием нелинейных нагрузок, на режимные показатели сети. Установлена возможность улучшения показателей качества электрической энергии за счет выбора фильтрокомпенсирующих устройств на основе генетического алгоритма.

Ключевые слова: распределительная электрическая сеть 0,4 кВ, гармонические искажения, фильтрокомпенсирующее устройство, генетический алгоритм, качество электрической энергии, несинусоидальность напряжения, ток нейтрального проводника.

Optimal Selection of Filter-Compensation Devices Based on a Genetic Algorithm in Low-Voltage Distribution Power Networks

Abduraxim D. Taslimov¹, Feruz M. Raximov^{2,a}, Asliddin O. Norqulov²

¹⁾ DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; ataslimov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-2856-6287>

^{2a)} PhD., Docent, Navoi State University of Mining and Technologies, Navoi, 210100, Uzbekistan; fer-uz.raximov.2017@mail.ru <https://orcid.org/0009-0008-6832-0509>

²⁾ Head teacher, Navoi State University of Mining and Technologies, Navoi, 210100, Uzbekistan; asliddin.norqulov.91@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-4521-8367>

Relevance: at present, the level of harmonic distortion in 0.4 kV low-voltage distribution networks is increasing due to the growing share of nonlinear loads, including electronic power supplies of LED lighting devices, switched-mode power supplies, frequency converters, and other electronic consumers. As a result, voltage nonsinusoidality increases, the current in the neutral conductor rises, additional power losses occur in transformers and cable lines, and electric power quality indicators deteriorate. The use of conventional compensation devices does not always ensure effective performance and, in some cases, may lead to resonance phenomena. Therefore, the optimal selection of filter-compensation devices for reducing harmonic distortion in 0.4 kV networks is an urgent scientific and practical task.

Aim: to determine the optimal type, rating, and connection point of filter-compensation devices for reducing harmonic distortion in 0.4 kV distribution networks, decreasing the total harmonic distortion of voltage, reducing active power losses, and improving electric power quality indicators.

Methods: in the study, a mathematical model of a 0.4 kV radial distribution network was developed, taking into account the harmonic composition of nonlinear loads. A genetic algorithm was used as the main method for solving the problem of selecting filter-compensation devices. In this process, the device type, rating, and connection point were optimized based on the objective function. The objective function included the total harmonic distortion of voltage, the share of individual harmonics, active power losses, and the current in the neutral conductor.

Results: the problem of reducing harmonic distortion in 0.4 kV distribution networks was analyzed using an 8-bus radial test system as an example. The results of assessing the influence of harmonic distortions caused by nonlinear loads on the network operating parameters are presented. The possibility of improving electric power quality indicators through the selection of filter-compensation devices based on a genetic algorithm was established.

Keywords: 0.4 kV distribution network, harmonic distortions, filter-compensation device, genetic algorithm, electric power quality, voltage nonsinusoidality, neutral conductor current.

1. Kirish (Introduction)

So'nggi yillarda past kuchlanishli taqsimlovchi elektr tarmoqlarining yuklama tarkibi tubdan o'zgardi. Klassik chiziqli iste'molchilar ulushi kamayib, ularning o'rmini diodli to'g'rilagichlar, chastota o'zgartirgichlar, impulsli quvvat manbalari, LED ta'minlash qurilmalari, UPS qurilmalari, maishiy elektronika va kichik quvvatli avtomatlashtirilgan elektr yuritmalari egallamoqda. Bunday yuklamalar sinusoidal bo'lmagan tok iste'mol qiladi va natijada tarmoqda garmonik toklar paydo bo'ladi. Bu garmonik toklar liniya va transformator impedanslarida garmonik kuchlanishlar hosil qilib, umumiy kuchlanish sifati ko'rsatkichlarini yomonlashtiradi [1].

Past kuchlanishli ommaviy tarmoqlar uchun IEC 61000-2-2 muvofiqlik darajalari qo'llanadi, bunda THD va ayrim tartibli garmonik kuchlanishlar uchun chegaraviy qiymatlar beriladi. 5-garmonika uchun 6%, 7-garmonika uchun 5%, 11-garmonika uchun 3,5%, 13-garmonika uchun

3% hamda umumiy garmonik buzilish uchun 8% atrofidagi chegaralar muhim tayanch sifatida ishlatiladi. EN 50160 ham ommaviy taqsimlovchi tarmoqlarda kuchlanish sifati bir haftalik 10 daqiqalik o'rtacha qiymatlar bo'yicha baholanishini va *THD* odatda haftaning 95% vaqtida 8% dan oshmasligi kerakligini ko'rsatadi [2].

Amaliyotda oddiy kondensator batareyalarini o'rnatish ko'pincha yetarli emas. Chunki ular reaktiv quvvatni qoplasada, tarmoqning rezonans chastotasini 5– yoki 7–garmonik hududiga yaqinlashtirib yuborishi mumkin. Shu sababli filtr–kompensatsiya qurilmalarini faqat quvvat koeffitsienti nuqtai nazaridan emas, balki garmonik tarkib, tugun sezgirligi, yo'qotishlar va rezonans xavfi bilan birga kompleks tanlash talab etiladi. So'nggi tadqiqotlar filtrlarni joylashtirish va o'lchamlarini tanlash masalasi ko'p mezonli hamda noxiziqli xarakterga ega ekanini, shuning uchun metaevristik usullar, jumladan genetik algoritim, bu sinf masalalar uchun mos ekanini ko'rsatmoqda [3].

Ushbu maqolaning maqsadi 0,4 kV taqsimlovchi tarmoqlarda garmonik buzilishlarni kamaytirish uchun filtr–kompensatsiya qurilmalarini genetik algoritim asosida tanlashning nazariy va hisobiy asoslarini ishlab chiqish, hamda sonli misolda uning samaradorligini ko'rsatishdan iborat.

2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

Tadqiqot obyekti sifatida past kuchlanishli taqsimlovchi elektr tarmoqlarida ishlovchi noxiziqli yuklamalar hamda ular ta'sirida yuzaga keladigan garmonik buzilishlar qabul qilindi. Tadqiqot materiallari sifatida radial tuzilmadagi past kuchlanishli taqsimlovchi elektr tarmog'ining hisobiy modeli, tarmoq tugunlari, kabel liniyalari, transformator, noxiziqli iste'molchilar yuklama tarkibi va filtr–kompensatsiya qurilmalarining asosiy parametrlari olindi. Noxiziqli yuklamalar spektrida 5-, 7-, 11- va 13-tartibli garmonikalar asosiy tashkil etuvchilar sifatida hisobga olindi [4].

Tarmoq rejimini baholashda kuchlanishning umumiy garmonik buzilish koeffitsienti, individual garmonikalar ulushi, aktiv quvvat isroflari va neytral o'tkazgich toki asosiy ko'rsatkichlar sifatida tanlandi. Kuchlanishning umumiy garmonik buzilish koeffitsienti quyidagicha aniqlandi:

$$THD_u = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%; \quad (1)$$

bu yerda U_1 – asosiy garmonik kuchlanish, $U_2, U_3, \dots, U_n$ – yuqori tartibli garmonik kuchlanishlar.

Tarmoqdagi aktiv quvvat isroflari quyidagi ifoda asosida hisoblandi:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^m I_i^2 R_i; \quad (2)$$

bu yerda I_i – tarmoq uchastkasidagi tok, R_i – uchastkaning aktiv qarshiligi, m – uchastkalar soni.

Cheklovlar esa quyidagicha beriladi:

$$\begin{cases} U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \\ I_i \leq I_{\text{ruxsat}} \\ THD \leq THD_{\text{ruxsat}} \\ K_{ns} \leq K_{\text{ruxsat}} \end{cases}. \quad (3)$$

Filtr–kompensatsiya qurilmalarini tanlash masalasi ko'p mezonli optimallashtirish masalasi sifatida qaraldi. Maqsad funksiyasiga kuchlanishning umumiy garmonik buzilish koeffitsienti, individual garmonikalar ulushi, aktiv quvvat yo'qotishlari va neytral o'tkazgich toki kiritildi [5]:

$$F = \omega_1 THD_u + \omega_2 \sum U_h + \omega_3 \Delta P + \omega_4 I_N; \quad (4)$$

bu yerda U_h – individual garmonikalar ulushi, I_N – neytral o'tkazgich toki, $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ – vazn koeffitsientlari.

Optimal yechimni aniqlashda asosiy usul sifatida genetik algoritmdan foydalanildi. Bunda filtr–kompensatsiya qurilmasining turi, quvvati va ulanish nuqtasi xromosoma parametrlari sifatida kodlandi. Dastlabki populyatsiya shakllantirilib, har bir yechim varianti maqsad funksiyasi bo'yicha baholandi. Seleksiya, krossingover va mutatsiya operatorlari asosida yangi avlodlar hosil qilinib, maqsad funksiyasining eng kichik qiymatiga mos keluvchi variant optimal yechim sifatida qabul qilindi [6].

Hisoblashlarda bir martalik sozlangan passiv filtrlar hamda detunirlangan kompensatsiya qurilmalari ko'rib chiqildi. Filtr parametrlarini aniqlashda rezonans sharti asos qilib olindi [7]:

$$2\pi h f L = \frac{1}{2\pi h f C}; \quad (5)$$

bu yerda h – garmonik tartibi, f – asosiy chastota, L –induktivlik, C – sig'im.

Mazkur ifodalar asosida 5– va 7–garmonikalar uchun mo'ljallangan filtrlarning induktivlik va sig'im parametrlari hisoblandi. Detunirlangan kompensatsiya qurilmasi esa reaktiv quvvatni qoplash bilan birga rezonans xavfini kamaytiruvchi element sifatida qaraldi [8].

Optimal yechimni aniqlashda asosiy usul sifatida genetik algoritmdan foydalanildi. Har bir ehtimoliy yechim xromosoma ko'rinishida ifodalanib, u quyidagi parametrlarni o'z ichiga oldi:

- filtr–kompensatsiya qurilmasining turi;
- qurilmaning quvvati;
- ulanish tuguni.

Xromosomaning umumiy ko'rinishi quyidagicha yozildi:

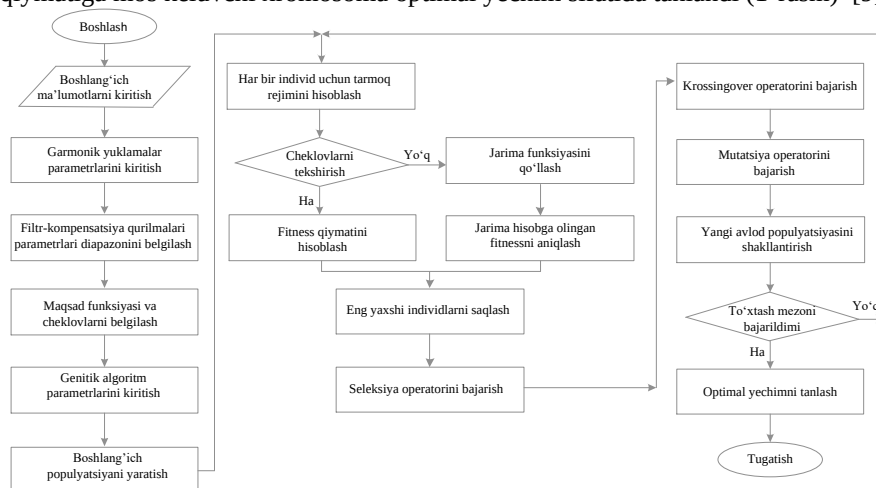
$$X = \{T_i, Q_i, N_i\} \quad i=1,2,\dots,m; \quad (6)$$

bu yerda T_i – qurilma turi, Q_i – qurilma quvvati, N_i – qurilmaning tarmoqqa ulanish tuguni.

Genetik algoritmnining ishlash jarayoni quyidagi bosqichlarda amalga oshirildi:

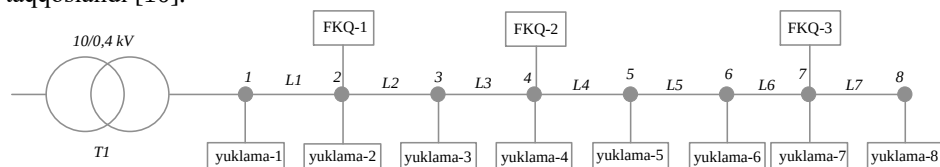
- boshlang'ich populyatsiyani shakllantirish;
- har bir individ uchun tarmoq rejimini hisoblash;
- maqsad funksiyasi qiymatini aniqlash;
- seleksiya orqali eng yaxshi individlarni tanlash;
- crossingover operatori yordamida yangi kombinatsiyalar hosil qilish;
- mutatsiya operatori yordamida ayrim genlarni tasodifiy o'zgartirish;
- yangi populyatsiyani shakllantirish;
- to'xtash sharti bajarilguncha iteratsiyani takrorlash.

To'xtash sharti sifatida maksimal iteratsiyalar soniga erishish yoki maqsad funksiyasining ketma-ket avlodlarda sezilarli o'zgarmay qolishi qabul qilindi. Natijada maqsad funksiyasining minimal qiymatiga mos keluvchi xromosoma optimal yechim sifatida tanlandi (1-rasm) [9].



1-rasm. Nochiziqli yuklamali elektr tarmoqlari uchun genetik optimallashtirish algoritmi
Fig. 1. Genetic optimization algorithm for electrical networks with nonlinear loads

Taklif etilgan usulning samaradorligini baholash maqsadida 8 tugunli radial test sxema (2-rasm) asosida hisobiy tadqiqotlar o'tkazildi. Tadqiqot jarayonida tarmoqning ikki xil rejimi, ya'ni boshlang'ich va optimallashtirilgan holatlari ko'rib chiqildi. Boshlang'ich holatda tarmoq tarkibida filtr-kompensatsiya qurilmalari mavjud emas deb qabul qilinib, nochiziqli yuklamalar ta'sirida shakllanuvchi rejim ko'rsatkichlari aniqlandi. Optimallashtirilgan holatda esa genetik algoritim yordamida tanlangan filtr-kompensatsiya qurilmalari tarmoqqa ulandi va tarmoqning asosiy rejim ko'rsatkichlari qayta hisoblandi. Olingan natijalar asosida boshlang'ich va optimallashtirilgan holatlar o'zaro taqqoslandi [10].



2-rasm. Filtr-kompensatsiya qurilmalarining ulanish nuqtalari ko'rsatilgan 8 tugunli radial test sxema
Fig. 2. An 8-bus radial test system with the connection points of filter-compensation devices

Tarmoq quyidagi parametrlarga ega:

- 1) transformator 10/0,4 kV, 250 kVA, $u_k=4,5\%$, $P_k=3,6$ kW;
- 2) tarmoqning umumiy uzunligi –0,86 km;
- 3) magistral kabel AVVG 4×120 mm², uchastkalar bo'yicha 70–180 m;



- 4) tarmoqdagi umumiy maksimal faol yuklama –167 kW;
- 5) tarmoqdagi umumiy reaktiv yuklama –96 kVAr;
- 6) nochiziqli yuklama ulushi– 41%;
- 7) uch fazalar bo'yicha notekislik: A faza 58 kW, B faza 52 kW, C faza 57 kW;
- 8) garmonik buzilishlarning uchta asosiy manbai sifatida 6-pulsli to'g'rilagichlar, LED ta'minot qurilmalari hamda ofis texnikasining impulsli quvvat manbalari.

Yuklamalarning garmonik spektri tipik 6-pulsli to'g'rilagich va elektron yuklamalar uchun qabul qilinib, tok bo'yicha dominant tarkib 5-, 7-, 11- va 13-tartiblardan iborat deb olindi. Bu spektr IEC va sanoat qo'llanmalarida uchraydigan odatiy manzaraga mos keladi. Filtrsiz boshlang'ich rejimda quvvat oqimi va garmonik oqim hisobi natijasida 1-jadvaldagi qiymatlar olindi [11].

1-jadval. Boshlang'ich va optimallashtirilgan rejim ko'rsatkichlari

Table 1. Comparison of the main operating parameters in the initial and optimized modes

I_N , (A)	U_L , (V)	U_f , (V)	ΔP , (kW)	$\cos\varphi$	THD_u , (%)	U_5 , (%)	U_7 , (%)	U_{11} , (%)	U_{13} , (%)
142 A	392–398 V	211,6	9,73	0,86	11,84	7,10	4,62	2,41	1,96

Bu holatda 5-garmonika va umumiy THD me'yorlardan oshib ketgani ko'rinadi. 7-, 11- va 13-garmoniklar me'yor ichida bo'lsa ham, umumiy buzilish va 5-garmonik dominant komponent sifatida hal qiluvchi rol o'ynaydi.

3. Natijalar (Results)

Boshlang'ich hisoblash natijalari tarmoqda garmonik buzilishlar darajasi sezilarli ekanini ko'rsatdi. Xususan, umumiy ulanish nuqtasida kuchlanishning umumiy garmonik buzilish koeffitsienti $THD_u=11,84\%$ ni tashkil etdi. Mazkur qiymat past kuchlanishli taqsimlovchi elektr tarmoqlari uchun qabul qilinadigan me'yoriy chegaradan yuqori bo'lib, tarmoqda elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlari yomonlashganini ifodalaydi. Shu bilan birga, 5-tartibli garmonik kuchlanish ulushi 7,10%ga yetgani dominant garmonik komponent aynan ushbu tartib bilan bog'liqligini ko'rsatadi. Bundan tashqari, tarmoqdagi aktiv quvvat yo'qotishlari 9,73 kW ni, neytral o'tkazgich toki esa 142 A ni tashkil etdi. Olingan natijalar nochiziqli yuklamalar ta'sirida nafaqat kuchlanish nosinusoidaligi ortishini, balki tarmoq elementlarining qo'shimcha termik yuklanishi, quvvat yo'qotishlarining ko'payishi hamda ekspluatatsion ishonchlikning pasayishi kuzatilishini tasdiqlaydi.

Genetik algoritim 187-avlodda barqarorlashdi va quyidagi konfiguratsiyani eng maqbul deb topdi:

- 1) 2-tugunda 50 kVArli detunirlangan kompensatsiya qurilmasi;
- 2) 4-tugunda 45 kVArli 5-garmonikaga sozlangan filtr;
- 3) 7-tugunda 30 kVArli 7-garmonikaga sozlangan filtr.

Genetik algoritim asosida aniqlangan optimal filtr-kompensatsiya qurilmalari konfiguratsiyasi tarmoqqa joriy etilgandan so'ng uning asosiy rejim ko'rsatkichlarida sezilarli ijobiy o'zgarishlar kuzatildi. Jumladan, umumiy ulanish nuqtasida kuchlanishning umumiy garmonik buzilish koeffitsienti THD_u 4,21% gacha kamaydi, bu esa garmonik buzilishlar darajasining me'yoriy talablarga yaqinlashtirilganini ko'rsatadi. Individual garmonikalar tarkibida ustun bo'lgan 5-tartibli garmonik kuchlanish ulushi 2,31% ni tashkil etdi, ya'ni boshlang'ich holatga nisbatan sezilarli ravishda pasaydi. Shu bilan birga, tarmoqdagi aktiv quvvat yo'qotishlari 6,82 kW gacha kamayib, optimallashtirish natijasida energiya samaradorligi oshgani aniqlandi. Neytral o'tkazgich toki 79 A gacha pasaygani esa tarmoq elementlarining termik yuklanishini kamaytirish va ekspluatatsion ishonchligini oshirish nuqtai nazaridan muhim natija hisoblanadi. Bundan tashqari, quvvat koeffitsientining 0,86 dan 0,97 gacha yaxshilanishi filtr-kompensatsiya qurilmalarining nafaqat garmonik buzilishlarni kamaytirish, balki reaktiv quvvat almashinuvini ham samarali me'yorlashini ko'rsatadi.

Boshlang'ich va optimallashtirilgan rejim ko'rsatkichlarining taqqoslanishi 2-jadvalda keltirilgan.

Natijalar shuni ko'rsatadiki, genetik algoritim tanlagan kombinatsiya nafaqat THD ni me'yor ichiga tushirdi, balki yo'qotishlar va neytral tokni ham sezilarli kamaytirdi. Ayniqsa 5-garmonikaning 7,10% dan 2,31% gacha tushishi muhim natija bo'ldi, chunki aynan shu komponent boshlang'ich rejimda asosiy buzuvchi omil edi.

Buzilishlarni kamaytirish masalasi oddiy reaktiv quvvat kompensatsiyasidan ancha murakkab ekanini ko'rsatadi. Agar tarmoqda faqat kondensator qurilmasi o'rnatilsa, ma'lum darajada reaktiv quvvat qoplanishi mumkin, biroq garmonik muhitda bunday yechim rezonans xavfini keltirib chiqarishi va aksincha, kuchlanish nosinusoidaligini yanada oshirishi ehtimoli mavjud. Mazkur tadqiqot natijalari esa filtrlash va kompensatsiyani birgalikda ko'rish zarurligini tasdiqlaydi.



Aniqlangan optimal konfiguratsiya tarkibida ikkita bir martalik sozlangan filtr va bitta detunlangan kompensatsiya bosqichi mavjudligi past kuchlanishli aralash yuklamali tarmoqlarda dominant garmonik komponentalar odatda 5– va 7–tartiblarda mujassamlashishini amaliy jihatdan ko'rsatdi. 11–va 13–garmonikalar alohida filtrsiz ham kamayganligi tarmoqning umumiy garmonik qarshilik xarakteristikasi qayta shakllanganini anglatadi.

2-jadval. Boshlang'ich va optimallashtirilgan rejim ko'rsatkichlari

Table 2. Comparison of the main operating parameters in the initial and optimized modes

T/r	Ko'rsatkich	Boshlang'ich holat	Optimal holat	O'zgarish
1	THD_u , %	11,84	4,21	-64,4%
2	U_5 , %	7,10	2,31	-67,5%
3	U_7 , %	4,62	1,44	-68,8%
4	U_{11} , %	2,41	1,18	-51,0%
5	U_{13} , %	1,96	0,93	-52,6%
6	ΔP , kW	9,73	6,82	-29,9%
7	$\cos\varphi$	0,86	0,97	+0,11

Neytral o'tkazgich tokining 142 A dan 79 A gacha kamayishi amaliy nuqtai nazardan alohida ahamiyatga ega. Chunki past kuchlanishli tarmoqlarda neytral o'tkazgichning ortiqcha yuklanishi transformator va kabel liniyalarida qo'shimcha qizishga olib keladi. Shuning uchun filtr-kompensatsiya qurilmalarini tanlashda neytral tokni maqsad funksiyasiga kiritish to'g'ri ilmiy yondashuv ekanligi ushbu natijalar bilan tasdiqlandi.

Yana bir muhim jihat shundaki, optimal texnik yechim hamisha minimal THD_u qiymatini beruvchi yechim bilan bir xil bo'lavermaydi. Ba'zi hollarda qo'shimcha filtr o'rnatish orqali garmonik darajani yanada pasaytirish mumkin, biroq bu kapital xarajatlarning keskin ortishiga olib keladi. Genetik algoritmnining afzalligi shundaki, u ko'p mezonli maqsad funksiyasi asosida texnik va ekspluatatsion jihatdan eng maqbul kompromiss variantni topishga imkon beradi.

4. Xulosa (Conclusion)

Mazkur tadqiqotda 0,4 kV taqsimlovchi elektr tarmoqlarida garmonik buzilishlarni kamaytirish uchun filtr-kompensatsiya qurilmalarini genetik algoritim asosida tanlash usuli ishlab chiqildi. Ishlab chiqilgan modelda filtr turi, quvvati, sozlash tartibi, sifat koeffitsienti va ulanish tuguni bir vaqtda optimallashtirildi.

Hisobiy stsenariyda boshlang'ich holatdagi THD_u 11,84% bo'lib, bu me'yoriy 8% chegaradan yuqori ekanligi aniqlandi. Genetik algoritim 4–tugunda 45 kVAr 5–garmonik filtr, 7–tugunda 30 kVAr 7–garmonik filtr va 2–tugunda 50 kVAr detunirlangan kompensatsiya bosqichidan iborat optimal kombinatsiyani tanladi. Natijada THD_u 4,21% gacha, 5–garmonik kuchlanish 2,31% gacha, aktiv quvvat isroflari 6,82 kW gacha, neytraldan oquvchi tok esa 79 A gacha kamaydi. Quvvat koeffitsienti 0,86 dan 0,97 gacha yaxshilandi.

Ushbu tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, 0,4 kV tarmoqlarda garmonikalarni kamaytirish masalasi oddiy kompensatsiya bilan emas, balki filtrlash, kompensatsiya, tugun tanlash va iqtisodiy optimallashtirish masalasi sifatida ko'rilishi lozim. Genetik algoritim aynan shunday murakkab, ko'p parametrlil va nohiziqli muammolar uchun samarali vosita foydalanildi.

ADABIYOT

1. Гайи́бов Т.Ш. Методы и алгоритмы оптимизации режимов электроэнергетических систем. – Т.: Ташкентский государственный технический университет, 2014. – 188 с.
2. Гайи́бов Т., Узаков Б., Шаназаров А. Алгоритм оптимизации режима энергосистемы с учетом потерь в сетях и включения-отключения. // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2612. – 050011. DOI: 10.1063/5.0117667.
3. Ibadullayev M.I., Tovboyev A.N., Yesenbekov A.K., Nazarov A.I. Avtoparametrik tebranishlarni tahlil qilishda chastota-energiya munosabatlari // O'zbekiston konchilik xabarnomasi ilmiy-texnik va ishlab chiqarish jurnali. – Navoiy, 2017. – № 2. – 165-167-betlar.
4. Tog'ayev I.B., Isoqulov D.Sh., Turniyozov Z.A. Havo elektr uzatish liniyalarining holatini baholash bilan ularni monitoring qilish // Central Asian Research Journal for Interdisciplinary Studies (CARJIS). – 2022. – Vol. 2. – Issue 5.
5. Tovboyev A.N., Ibadullayev M.I., Murodov H.Sh., Narzullayev B.Sh. Yuqori kuchlanishli elektr tarmoq va tizimlarida subgarmonik ferrozonans // O'zbekiston konchilik xabarnomasi ilmiy-texnik va ishlab chiqarish jurnali. – Navoiy, 2020. – № 4(83). – 110–113-betlar.

6. Raximov F. Shahar taqsimlovchi elektr tarmoqlarida ko'p mezonli optimallashtirish usuli orqali energiya samaradorligini oshirish // Journal of Advances in Engineering Technology. – 2025. – № 4. – 33-40-betlar.
7. Raximov F., Taslimov A., Majidov A., Norqulov A. Optimization of losses by switching to higher voltage in distribution networks // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 525. – 03009.
8. Yang H., Richards G.G. Optimum Distribution System Harmonic Filter Design Using a Genetic Algorithm // Electric Power Systems Research. – 1994. – Vol. 30. – P. 263-267. DOI: 10.1016/0378-7796(94)00865-5.
9. Milovanović M., Radosavljević J., Klimenta D., Perović B. GA-Based Approach for Optimal Placement and Sizing of Passive Power Filters to Reduce Harmonics in Distorted Radial Distribution Systems // Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 101. – P. 787-803. DOI: 10.1007/s00202-019-00805-w.
10. El-Ela A.A., Allam S.M., Mubarak A.A., El-Sehiemy R.A. Harmonic Mitigation by Optimal Allocation of Tuned Passive Filter in Distribution System // Energy and Power Engineering. – 2022. – Vol. 14. – P. 291-312. DOI: 10.4236/epe.2022.147016.
11. Zhao Y., Deng H., Li J., Xia D. Optimal planning of harmonic filters on distribution systems by chance constrained programming // Electric Power Systems Research. – 2004. – Vol. 68. – No. 2. – P. 149-156. DOI: 10.1016/S0378-7796(03)00156-1.

REFERENCES

1. Gayibov, T.Sh. Methods and Algorithms for Optimization of Electric Power System Operating Modes. – Tashkent: Tashkent State Technical University, 2014. – 188 p.
2. Gayibov, T., Uzakov, B., Shanazarov, A. Algorithm for Optimization of Power System Operating Mode Considering Network Losses and Switching Operations // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2612. – 050011. DOI: 10.1063/5.0117667.
3. Ibodullayev, M.I., Tovboyev, A.N., Yesenbekov, A.K., Nazarov, A.I. Frequency-Energy Relationships in the Analysis of Auto-Parametric Oscillations // Mining Bulletin of Uzbekistan. – 2017. – No. 2. – P. 165–167.
4. Togayev, I.B., Isoqulov, D.Sh., Turniyozov, Z.A. Monitoring of Overhead Power Transmission Lines Based on Their Condition Assessment // Central Asian Research Journal for Interdisciplinary Studies (CARJIS). – 2022. – Vol. 2. – Issue 5.
5. Tovboyev, A.N., Ibadullayev, M.I., Murodov, H.Sh., Narzullayev, B.Sh. Subharmonic Ferroresonance in High-Voltage Electric Networks and Systems // Mining Bulletin of Uzbekistan. – 2020. – No. 4(83). – P. 110–113.
6. Rakhimov, F. Improving Energy Efficiency in Urban Distribution Electric Networks through a Multi-Criteria Optimization Method // Journal of Advances in Engineering Technology. – 2025. – No. 4. – P. 33–40.
7. Rakhimov, F., Taslimov, A., Majidov, A., Norqulov, A. Optimization of Losses by Switching to Higher Voltage in Distribution Networks // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 525. – 03009.
8. Yang, H., Richards, G.G. Optimum Distribution System Harmonic Filter Design Using a Genetic Algorithm // Electric Power Systems Research. – 1994. – Vol. 30. – P. 263–267. DOI: 10.1016/0378-7796(94)00865-5.
9. Milovanović, M., Radosavljević, J., Klimenta, D., Perović, B. GA-Based Approach for Optimal Placement and Sizing of Passive Power Filters to Reduce Harmonics in Distorted Radial Distribution Systems // Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 101. – P. 787–803. DOI: 10.1007/s00202-019-00805-w.
10. El-Ela, A.A., Allam, S.M., Mubarak, A.A., El-Sehiemy, R.A. Harmonic Mitigation by Optimal Allocation of Tuned Passive Filter in Distribution System // Energy and Power Engineering. – 2022. – Vol. 14. – P. 291–312. DOI: 10.4236/epe.2022.147016.
11. Zhao, Y., Deng, H., Li, J., Xia, D. Optimal planning of harmonic filters on distribution systems by chance constrained programming // Electric Power Systems Research. – 2004. – Vol. 68. – No. 2. – P. 149–156. DOI: 10.1016/S0378-7796(03)00156-1.