



Past kuchlanishli elektr tarmoqlarida kuchlanish nosimmetriyasi va quvvat isroflari tahlili

Muzaffar B. Xudayarov¹, Jahongir A. Abduxalimov^{1,a}

¹ DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent shahri, Universitet ko'chasi 2-uy, muzaffar_hb@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2829-8980>

^{1,a} Doktorant, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent shahri, Universitet ko'chasi 2-uy, abduxalimovjahongir48@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-7155-4115>

Dolzarbli: so'nggi yillarda elektr energetika tizimlarida qayta tiklanuvchi energiya manbalarining keng joriy etilishi, iste'molchilar sonining ortishi hamda elektr yuklamalarining notekis taqsimlanishi natijasida past kuchlanishli elektr tarmoqlarida kuchlanish nosimmetriyasi va quvvat isroflari sezilarli darajada ortib bormoqda. Ayniqsa, 0,4 kV li radial taqsimlovchi tarmoqlarda bir fazali iste'molchilarning tartibsiz ulanishi natijasida fazalar bo'yicha toklarning nomutanosib taqsimlanishi kuzatiladi. Bu holat nol simdagi tokning ortishiga, transformator va kabel liniyalarida qo'shimcha issiqlik yo'qotishlarining yuzaga kelishiga hamda elektr energiyasi sifat ko'rsatkichlarining yomonlashishiga olib keladi. Bundan tashqari, quyosh elektr stansiyalarining (QES) past kuchlanishli tarmoqlarga integratsiyalashuvi elektr energiya sifati parametrlariga bevosita ta'sir ko'rsatmoqda. Agar QES ti-zimlari tarmoqqa optimal nuqtalarda ulanmasa, ayrim hollarda kuchlanishning ortib ketishi, teskari quvvat oqimi yoki fazalararo nosimmetriya yuzaga kelishi mumkin. Shu sababli past kuchlanishli elektr tarmoqlarida QES ulanishining texnik samaradorligini baholash dolzarb ilmiy-amaliy masalalardan biri hisoblanadi. Mazkur tadqiqotda DigSILENT PowerFactory dasturiy majmuasi asosida radial past kuchlanishli elektr tarmog'ining matematik modeli ishlab chiqilib, tarmoqdagi kuchlanish nosimmetriyasi, quvvat isroflari va yuklama taqsimoti tahlil qilindi. Shuningdek, kuchlanish past bo'lgan shinning kuchlanish ruxsat etilgan chegaradan chiqqan fazasiga qu-yosh elektr stansiyasi ulangandan keyingi tarmoq parametrlari ham qiyosiy ravishda baholandi.

Maqsad: past kuchlanishli elektr tarmoqlarida fazalar bo'yicha yuklama nosimmetriyasi natijasida yuzaga keladigan kuchlanish og'ishlari, nosimmetriya koeffitsientini ruxsat etilgan chegarada bo'lishi hamda quvvat isroflarini DigSILENT Power Factory dasturida tahlil etish hamda quyosh elektr stansiyasini optimal ulash orqali elektr energiyasi sifat ko'rsatkichlarini yaxshilash imkoniyatlarini asoslash.

Usullari: tadqiqot jarayonida DigSILENT PowerFactory dasturida 0,4 kV past kuchlanishli elektr tarmog'ining ish rejimlarini o'rganish uchun hisoblash-modellashtirish usullaridan foydalanildi. Tarmoqning radial modeli tuzilib, liniya parametrlari, iste'molchi yuklamalari hamda fazalar bo'yicha tok taqsimotlari modellashirildi. Kuchlanish nosimmetriyasi K_{2U} koeffitsienti orqali baholandi.

Natijalar: hisoblash natijalari shuni ko'rsatdiki, boshlang'ich holatda tarmoqdagi umumiy aktiv quvvat isroflari 6300,474 W ni tashkil etgan bo'lsa, QES ulangandan keyin ushbu qiymat 3316,01 W gacha kamaydi. Shu bilan birga, 16-shinadagi kuchlanish nosimmetriyasi koeffitsienti 6,01 % dan 2,17 % gacha pasaydi. Fazalar bo'yicha kuchlanish og'ishlari ham sezilarli yaxshilandi.

Kalit so'zlar: past kuchlanishli elektr tarmog'i, DigSILENT PowerFactory, quyosh paneli, kuchlanish nosimmetriyasi, aktiv quvvat isroflari.

Анализ несимметрии напряжений и потерь мощности в низковольтных электрических сетях

Музаффар Б.Худаяров¹, Жаҳонгир А.Абдухалимов^{1,a}

¹ DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент, улица Университетская, дом 2, muzaffar_hb@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2829-8980>

^{1,a} Докторант, Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент, улица Университетская, дом 2, abduxalimovjahongir48@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-7155-4115>

Актуальность: в результате хаотичного подключения однофазных потребителей в радиальных распределительных сетях напряжением 0,4 кВ. наблюдается неравномерное распределение токов по фазам. Это приводит к увеличению тока в нулевом проводе, возникновению дополнительных тепловых потерь в трансформаторах и кабельных линиях, а также ухудшению показателей качества электроэнергии. Кроме того, интеграция солнечных электростанций (СЭС) в низковольтные сети напрямую влияет на параметры качества электроэнергии. В данном исследовании разработана математическая модель радиальной низковольтной электрической сети на основе программного комплекса DigSILENT PowerFactory, проведен анализ несимметрии напряжения в сети, потерь мощности и распределения нагрузки. Это напрямую влияет на параметры качества электроэнергии. Если системы QES не подключены к сети в оптимальных точках, в некоторых случаях могут возникнуть перенапряжение, обратный поток мощности или межфазная асимметрия. Поэтому оценка технической эффективности подключения КЭС в низковольтных электрических сетях является одной из актуальных научно-практических задач. В данном исследовании разработана математическая модель радиальной низковольтной электрической сети на основе программного комплекса DigSILENT PowerFactory, проведен анализ несимметрии напряжения в сети, потерь мощности и распределения нагрузки. Также

For citation: Khudayarov M.B., Abdukhalimov J.A. Analysis of voltage unbalance and power losses in low-voltage power networks. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no 3, pp. 59-67.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23203>

503

Received: 15.01.2026

Revised: 10.02.2026

Accepted: 12.03.2026

Published: 25.09.2026

Copyright: © Muzaffar B. Khudayarov, Jahongir A. Abdukhalimov 2026. 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/>).



были сравнительно оценены параметры сети после подключения солнечной электростанции к фазе шины с пониженным напряжением, выходящим за пределы допустимого.

Цель: анализ отклонений напряжения, возникающих в результате фазовой симметрии нагрузки в низковольтных электрических сетях, наличия коэффициента симметрии в допустимых пределах и потерь мощности в программе DigSilent Power Factory и обоснование возможности улучшения показателей качества электроэнергии за счет оптимального подключения солнечной электростанции.

Методы: в ходе исследования использовались расчетно-моделирующие методы для изучения режимов работы низковольтной электрической сети 0,4 кВ в программе DigSILENT PowerFactory. Была создана радиальная модель сети, смоделированы параметры линии, нагрузки потребителей и распределение тока по фазам. Несимметрия напряжения оценивалась по коэффициенту K_{2u} .

Результаты: результаты расчета показали, что в исходном состоянии общие потери активной мощности в сети составляли 6300,474 Вт, а после подключения КЭС это значение снизилось до 3316,01 Вт. При этом коэффициент несимметрии напряжения на шинах 16 снизился с 6,01% до 2,17%. Отклонения напряжения по фазам также значительно улучшились.

Ключевые слова: низковольтная электросеть, DigSILENT PowerFactory, солнечная панель, несимметрия напряжения, потери активной мощности.

Analysis of voltage unbalance and power losses in low-voltage power networks

Muzaffar B. Khudayarov¹, Jakhongir A. Abdukhalimov^{1,a}

¹ DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent city, Universitet street, 2. muzaffar_hb@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2829-8980>

^{1,a} Doctoral student, Tashkent State Technical University, Tashkent city, Universitet street, 2, abduxalimovjakhongir48@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-7155-4115>

Relevance: in recent years, as a result of the widespread introduction of renewable energy sources in electric power systems, the increase in the number of consumers, and the uneven distribution of electrical loads, voltage asymmetry and power losses in low-voltage electrical networks have increased significantly. In particular, in radial distribution networks with a voltage of 0.4 kV, an uneven distribution of currents by phases is observed as a result of the random connection of single-phase consumers. This situation leads to an increase in current in the neutral wire, additional heat losses in transformers and cable lines, and a deterioration in the quality indicators of electricity. In addition, the integration of solar power plants (QES) into low-voltage networks directly affects the quality parameters of electricity. If QES systems are not connected to the network at optimal points, in some cases, overvoltage, reverse power flow, or interphase asymmetry may occur. Therefore, the technical efficiency of QES connection in low-voltage power grids is one of the urgent scientific and practical issues. In this study, a mathematical model of a radial low-voltage power grid was developed based on the DigSILENT PowerFactory software package, and the voltage asymmetry, power losses, and load distribution in the grid were analyzed. The network parameters after connecting the solar power plant to the phase of the tire with low voltage were also comparatively evaluated.

Aim: voltage deviations caused by Phase charge symmetries in low voltage power grids, keeping the symmetry coefficient at the permissible limit, as well as analyzing power wastes in the DigSILENT Power Factory program, as well as justifying the possibility of improving electricity quality indicators by optimally connecting a solar power plant.

Methods: during the study, computational and modeling methods were used in the DigSILENT PowerFactory program to study the operating modes of a 0.4 kV low-voltage power grid. A radial model of the network was constructed and Line parameters, consumer loadings, and phase-wise current distributions were modeled. The voltage symmetry was evaluated through the k_{2u} coefficient.

Results: the calculation results showed that the total active power losses in the network in the initial state were 6300.474 W, while after connecting the QES, this value decreased to 3316.01 W. At the same time, the coefficient of voltage symmetry in tire 16 decreased from 6.01% to 2.17%. Phase strain deviations have also improved significantly.

Keywords: low-voltage power grid, DigSILENT PowerFactory, solar panel, voltage asymmetry, active power losses.

1. Kirish (Introduction)

Hozirgi vaqtda elektr energetika tizimlarining barqaror ishlashi va elektr energiyasi sifatini ta'minlash energetika sohasidagi asosiy ilmiy-texnik muammolardan biri hisoblanadi. Elektr energiyasining sifati iste'molchilarning ishonchli elektr ta'minoti, elektr uskunalarning xizmat muddati va energetik samaradorlik bilan bevosita bog'liqdir. Ayniqsa, past kuchlanishli taqsimlovchi elektr tarmoqlarda fazalar bo'yicha yuklamalarning notekis taqsimlanishi elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlarining sezilarli yomonlashishiga olib kelmoqda. Past kuchlanishli radial tarmoqlarda bir fazali yuklamalarning keng qo'llanilishi natijasida fazalar orasida tok va kuchlanish nosimmetriyasi yuzaga keladi. Bunday nosimmetriya elektr uzatish liniyalarida qo'shimcha quvvat isroflarini keltirib chiqaradi, nol simdagi tokni oshiradi va transformatorlarning qizib ishlashiga sabab bo'ladi. Natijada elektr energiyasi uzatish samaradorligi pasayadi hamda ekspluatatsion xarajatlar ortadi. Qayta tik-



lanuvchi energiya manbalarining, xususan quyosh elektr stansiyalarining past kuchlanishli tarmoqlarga integratsiyalashuvi ushbu muammoni yangi bosqichga olib chiqmoqda. Bir tomondan, QES tizimlari lokal yuklamalarni qoplash orqali quvvat isroflarini kamaytiradi, ikkinchi tomondan esa noto'g'ri ulanish nuqtalarida kuchlanish nosimmetriyasi va tarmoqning ish rejimlariga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Shu sababli zamonaviy dasturiy vositalar asosida past kuchlanishli tarmoqlarning ish rejimlarini modellashtirish, kuchlanish nosimmetriyasi va quvvat isroflarini baholash hamda QES ulanishining samaradorligini aniqlash muhim ilmiy-amaliy ahamiyat kasb etadi. Mazkur tadqiqotda DigSILENT PowerFactory dasturi asosida 0,4 kV li elektr tarmog'ining matematik modeli ishlab chiqildi. Tarmoqda 14 ta iste'molchi yuklamasi va 20 ta liniya uchastkalari modellashtirildi. Tahlillarda ikki ya'ni QES ulanmasdan oldingi va QES ulangandan keyingi holatlar amalga oshirildi. Natijalar asosida kuchlanish nosimmetriyasi, quvvat isroflari va nosimmetriya koeffitsientini o'zgarishlari baholandi.

2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

Tadqiqot ishi obyekti sifatida 0,4 kV past kuchlanishli elektr tarmog'i tanlandi. Tadqiqot materiali sifatida tarmoqning bir chiziqli sxemasi, liniyalarning parametrlari, shuningdek, iste'molchilarning aktiv quvvati va quvvat koeffitsienti qiymatlaridan foydalanildi. Tarmoq DigSILENT PowerFactory dasturida modellashtirildi va unda 14 ta iste'molchi hamda 20 ta havo liniyasi mavjud bo'ldi.

Tarmoqning asosiy parametrlari quyidagilardan iborat:

- nominal kuchlanish – 0,4 kV;
- iste'molchilar soni – 14 ta;
- liniyalar soni – 20 ta;
- quvvat koeffitsienti – $\cos\varphi = 0,9$;
- yuklamalar bir va uch fazali rejimlarda ulangan.

Iste'molchilar fazalar bo'yicha notekis taqsimlanganligi sababli tarmoqda kuchlanish nosimmetriyasi yuzaga kelgan.

1-jadval. Tarmoq iste'molchilarining yuklama parametrlari

Table 1. Load parameters of network consumers

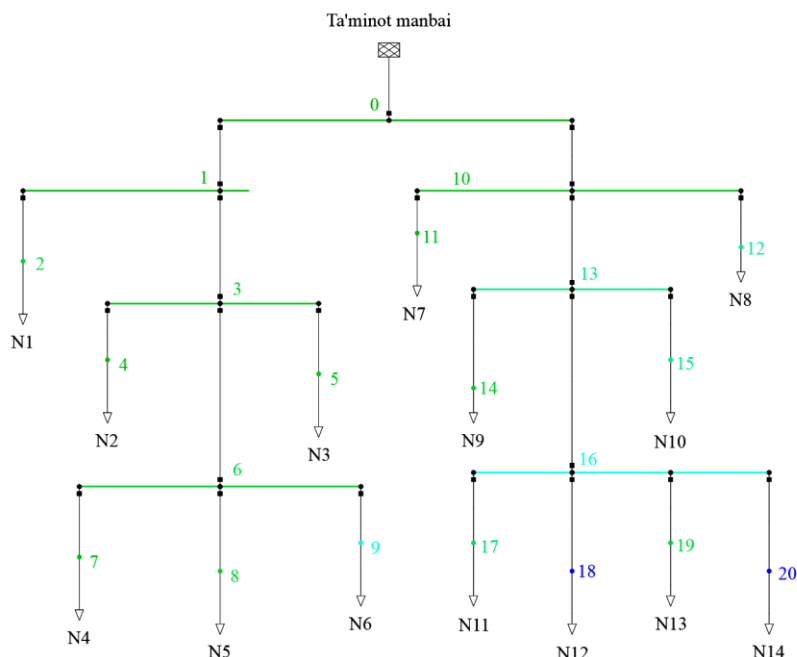
N _o	Iste'molchi	Ulangan fazasi	P (kW)	cosφ
1	N1	C	9.6	0.9
2	N2	A	2	0.9
3	N3	B	3.6	0.9
4	N4	A	2.2	0.9
5	N5	B	3.8	0.9
6	N6	C	9	0.9
7	N7	B	4	0.9
8	N8	C	9.2	0.9
9	N9	A	2.1	0.9
10	N10	ABC	21	0.9
11	N11	B	3.5	0.9
12	N12	C	9.5	0.9
13	N13	A	2	0.9
14	N14	C	10	0.9

2-jadval. Elektr uzatish liniyalari parametrlari

Table 2. Parameters of power lines

N _o	Liniya		Ulangan fazasi	Uzunligi (m)	R (om)	X (om)	I _{ruх.etil} (A)
	boshi	oxiri					
1	0	1	ABC	70	0.028	0.023	0.265
2	1	2	C	18	0.032	0.006	0.105
3	1	3	ABC	90	0.036	0.031	0.265
4	3	4	A	20	0.036	0.007	0.105
5	3	5	B	16	0.028	0.006	0.105
6	3	6	ABC	120	0.049	0.041	0.265
7	6	7	A	22	0.039	0.008	0.105
8	6	8	B	17	0.031	0.006	0.105
9	6	9	C	20	0.036	0.007	0.105
10	0	10	ABC	60	0.024	0.021	0.265

11	10	11	B	12	0.021	0.004	0.105
12	10	12	C	20	0.036	0.007	0.105
13	10	13	ABC	90	0.036	0.031	0.265
14	13	14	A	26	0.046	0.010	0.105
15	13	15	ABC	18	0.007	0.006	0.265
16	13	16	ABC	130	0.053	0.044	0.265
17	16	17	B	18	0.032	0.006	0.105
18	16	18	C	28	0.051	0.011	0.105
19	16	19	A	24	0.043	0.009	0.105
20	16	20	C	27	0.048	0.011	0.105



1-rasm. 0.4 kV past kuchlanishli elektr tarmogʻi sxemasi

Fig.1. 0.4 kV low voltage power grid scheme

Elektr uzatish liniyalaridagi aktiv quvvat isroflari quyidagi formula orqali aniqlandi:

$$\Delta P = I^2 \cdot R.$$

Tarmoqdagi umumiy aktiv quvvat isroflari barcha liniyalardagi isroflarning yigʻindisi sifatida hisoblandi:

$$\Delta P_{um} = \sum \Delta P_i.$$

Hisoblashlar DigSILENT PowerFactory dasturining Load Flow moduli yordamida amalga oshirildi.

Kuchlanish nosimmetriyasi K_{2U} koeffitsienti yordamida baholandi:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100 \, \%.$$

bu yerda: U_1 – toʻgʻri ketma-ketlik kuchlanishi; U_2 – teskari ketma-ketlik kuchlanishi.

Tadqiqotning ikkinchi bosqichida 16-shinaning C fazasiga 15 kW quvvatli quyosh elektr stansiya-si ulandi. QES ulanishidan keyin quyidagi parametrlar qayta hisoblandi:

- liniyalardagi toklar;
- aktiv quvvat isroflari;
- nol simdagi tok;
- kuchlanish ogʻishlari;
- K_{2U} nosimmetriya koeffitsienti.

3. Natijalar (Results)

Hisoblash natijalariga koʻra, boshlangʻich holatda tarmoqning ayrim uchastkalarida sezilarli no-simmetrik yuklanish kuzatildi. Ayniqsa, 0–10, 10–13 va 13–16 liniyalarida C fazadagi tok boshqa fazalarga nisbatan ancha yuqori boʻldi.

**3-jadval.** Har bir fazadan oqayotgan tok va aktiv quvvat isroflari**Table 3.** Current and active power losses flowing through each phase

№	Liniya		I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	I _N (A)	ΔP _A (W)	ΔP _B (W)	ΔP _C (W)	ΔP _N (W)	Yuklanishi %
	boshi	oxiri									
1	0	1	20	36	95	67	11.62	37.99	257.93	129.04	35.7
2	1	2			48	48			74.7	74.7	45.7
3	1	3	20	36	47	22	14.94	48.85	80.56	17.89	17.6
4	3	4	10			10	3.31			3.31	9.1
5	3	5		18		18		8.95		8.95	16.8
6	3	6	11	19	47	32	5.44	17.25	107.41	51.09	17.6
7	6	7	11			11	4.37			4.374	10.0
8	6	8		19		19		10.7		10.7	17.8
9	6	9			47	47			78.4	78.4	44.4
10	0	10	53	70	199	134	68.87	122.23	976.7	442.73	75.1
11	10	11		19		19		8.14		8.14	18.5
12	10	12			47	47			79.68	79.68	44.8
13	10	13	53	51	152	97	103.31	96.16	854.35	346.84	57.3
14	13	14	10			10	4.72			4.72	9.6
15	13	15	33	34	37	2	8.25	8.55	10.28	0.02	14.1
16	13	16	9	17	115	100	4.7	15.42	702.81	536.08	43.3
17	16	17		17		17		9.35		9.35	16.2
18	16	18			56	56			157.27	157.27	53.2
19	16	19	9			9	3.8			3.8	8.9
20	16	20			59	59			168.19	168.19	56.0
Jami							233.33	383.59	3548.28	2135.27	
Tarmoqdagi jami ΔP							6300.474				

Jadvalni tahlil qilganda tarmoqdagi eng katta yuklama asosan 0-1, 0-10, 10-13 va 13-16 liniyalarining C fazasiga tushgani ko'rinadi. Shu sababli tok ham, quvvat isrofi ham ko'proq aynan C fazada hosil bo'lgan. Bu qiymatlar C fazada yuklama juda notekis ekanligini ko'rsatadi. Bu esa fazalar orasidagi nosimmetriya kuchli ekanini bildiradi. Shu sababli nol simdagi tok va quvvat isrofi ham juda katta ekanligini ko'rishimiz mumkin.

4-jadval. Har bir shinaidagi kuchlanishlar**Table 4.** Voltages in each tire

Shina	U _A , (V)	U _B , (V)	U _C , (V)	U _A , %	U _B , %	U _C , %
0	230.94	230.94	230.94	4.97	4.97	4.97
1	232.26	229.86	225.23	5.57	4.48	2.38
2			222.13			0.97
3	232.37	227.81	222.38	5.62	3.55	1.08
4	231.68			5.31		
5		226.81			3.1	
6	233.41	226.87	217.62	6.1	3.12	-1.08
7	232.58			5.72		
8		225.73			2.6	
9			214.28			-2.6
10	232.49	229.7	220.64	5.68	4.41	0.29
11		228.86			4.03	
12			217.27			-1.24
13	233.08	229.04	208.95	5.95	4.11	-5.02
14	232.14			5.52		
15	232.77	228.73	208.58	5.8	3.97	-5.19
16	237.57	229.99	194.56	7.99	4.54	-11.56
17		228.9			4.05	
18			188.96			-14.11
19	236.76			7.62		
20			188.87			-14.15

0.4 kV li tarmoqlarda odatda kuchlanishning ruxsat etilgan og'ishi $\pm 5\%$ da normal holat, $\pm 10\%$ da esa chegaraviy holat deb olinadi. 4-jadvaldagi natijalardan ko'rinib turibdiki, asosan 16, 18, 20 shinalardagi kuchlanishlar ruxsat etilgan chegaradan chiqqan. Endi nosimmetriya koeffitsienti (K_{2U}) ni inobatga olgan holda, shinalardagi kuchlanishlarni tahlil qilamiz.

**5-jadval.** Shinalardagi nosimmetriya koeffitsienti natijalari**Table 5.** Tire asymmetry coefficient results

Shina	0	1	3	6	10	13	15	16
$K_{2U}, \%$	0	0,9	1,27	2,03	1,57	3,34	3,35	6,01

Natijalardan ko'rinib turibdiki, 16 shina ruxsat etilgan cheagraviy qiymatdan ya'ni 4 % dan oshib ketgan. Demak, tarmoq bo'yicha eng muammoli shina bu – 16 shinaning C fazasi aniqlandi.

Endi tarmoqdagi elektr energiya sifatini yaxshilash, ya'ni shinalardagi chegaradan chiqqan kuchlanishning qiymatlarini ruxsat etilgan oraliqda bo'lishini ta'minlash, ortiqcha yuklangan liniyalardagi aktiv quvvat isroflarini kamaytirish va nosimmetriya koeffitsientini 2 - 4 % da bo'lishini ta'minlash uchun eng muammoli shinaning ya'ni 16-shinaning C fazasiga 15 kW li quyosh panel ulab, tarmoqning sifat ko'rsatkichlarini tahlil qilamiz.

6-jadval. QES ulangandan keyingi har bir fazadagi tok va aktiv quvvat isroflari**Table 6.** Current and active power losses in each phase after QES connection

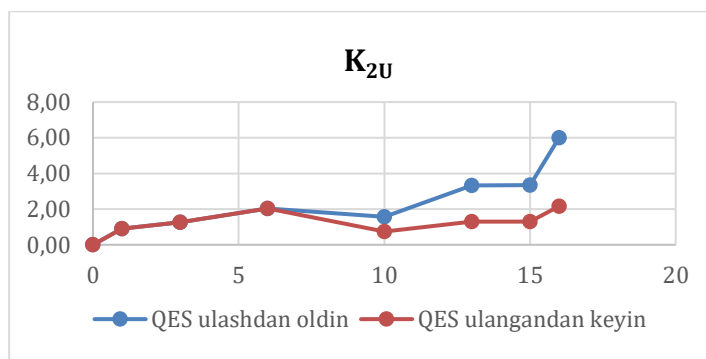
№	Liniya		I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	I_N (A)	ΔP_A (W)	ΔP_B (W)	ΔP_C (W)	ΔP_N (W)	Yuklan- ishi %
	boshi	oxiri									
1	0	1	20	36	95	67	11.62	37.99	257.9	129.03	35.7
2	1	2			48	48			74.7	74.7	45.7
3	1	3	20	36	47	22	14.94	48.85	80.54	17.89	17.6
4	3	4	10			10	3.31			3.31	9.1
5	3	5		18		18		8.95		8.95	16.8
6	3	6	11	19	47	32	5.44	17.25	107.39	51.09	17.6
7	6	7	11			11	4.37			4.374	10.0
8	6	8		19		19		10.7		10.7	17.8
9	6	9			47	47			78.39	78.4	44.4
10	0	10	54	70	126	61	72.94	122.21	391.7	90.83	47.6
11	10	11		19		19		8.14		8.14	18.5
12	10	12			46	46			76.56	76.56	43.9
13	10	13	54	51	82	39	109.42	96.14	247.91	55.47	30.9
14	13	14	10			10	4.97			4.97	9.8
15	13	15	34	34	35	1	8.68	8.55	9.3	0.003	13.4
16	13	16	10	17	50	36	5.16	15.41	135.81	67.9	19.0
17	16	17		17		17		9.34		9.34	16.2
18	16	18			50	50			128.33	128.39	48.1
19	16	19	10			10	4.17			4.17	9.4
20	16	20			53	53			137.21	137.28	50.6
Jami							245.06	383.57	1725.78	961.58	
Tarmoqdagi jami ΔP							3316.01				

7-jadval. QES ulangandan keyingi har bir shinadagi kuchlanishlar**Table 7.** Voltages on each tire after QES connection

Shina	$U_A, (V)$	$U_B, (V)$	$U_C, (V)$	$U_A, \%$	$U_B, \%$	$U_C, \%$
0	230.94	230.94	230.94	4.97	4.97	4.97
1	232.26	229.86	225.23	5.57	4.48	2.38
2			222.13			0.97
3	232.37	227.81	222.38	5.62	3.55	1.08
4	231.68			5.31		
5		226.8			3.09	
6	233.41	226.87	217.62	6.1	3.12	-1.08
7	232.58			5.72		
8		225.73			2.6	
9			214.28			-2.6
10	230.22	229.73	224.96	4.65	4.42	2.25
11		228.9			4.05	
12			221.65			0.75
13	227.37	229.11	219.64	3.35	4.14	-0.16
14	226.41			2.91		
15	227.05	228.79	219.3	3.2	4	-0.32
16	226.93	230.03	214.19	3.15	4.56	-2.64
17		228.93			4.06	
18			209.13			-4.94
19	226.09			2.77		
20			209.05			-4.98

**8-jadval.** Tarmoqqa QES ulashdan oldingi va keyingi nosimmetriya koeffitsienti natijalari**Table 8.** Results of the asymmetry coefficient before and after connecting the PV station to the grid

Shina	K_{2U} (QES ulashdan oldin)	K_{2U} (QES ulangandan keyin)
0	0	0
1	0,9	0,9
3	1,27	1,27
6	2,03	2,03
10	1,57	0,73
13	3,34	1,29
15	3,35	1,3
16	6,01	2,17

**2-rasm.** Nosimmetriya koeffitsienti farqlari**Figure 2.** Differences in the asymmetry coefficient

4. Munozara (Discussion)

Tahlil natijalari shuni ko'rsatdiki, 0,4 kV past kuchlanishli elektr tarmog'ida yuklamalarning fazalar bo'yicha notekis taqsimlanishi sababli tarmoqning ayrim qismlarida kuchlanish pasayishi, nosimmetriya koeffitsientining ortishi hamda quvvat isroflarining sezilarli oshishi kuzatilgan. Ayniqsa, yuklamaning asosan C fazada jamlangani sababli tarmoqning oxirgi qismida joylashgan shinalar va magistral liniyalarda eng muammoli holatga kelgan. Tahlillar asosida tarmoqdagi eng muammoli shina sifatida 16-shina aniqlangan. Ushbu shinning C fazasidagi kuchlanish 194,56 V ni tashkil etib, nominal qiymatga nisbatan -11,56 % ga kamaygan. Shu bilan birga, nosimmetriya koeffitsienti $K_{2U} = 6,01$ % ga yetib, ruxsat etilgan 4 % chegaradan ancha oshib ketgan. A fazadagi kuchlanish esa 237,57 V gacha ortgan bo'lib, fazalar orasidagi kuchlanishlar keskin farqlangani kuzatilgan. Bu holat yuklamalarning fazalar bo'yicha juda notekis taqsimlanganini va ayniqsa C fazaning ortiqcha yuklanganini ko'rsatadi.

16-shinadan keyingi oxirgi nuqtalarda joylashgan 18 va 20-shinalarda ham kuchlanishning keskin pasayishi qayd etilgan. Jumladan, 18-shinada C fazadagi kuchlanish 188,96 V bo'lib, kuchlanish og'ishi -14,11 % ni tashkil etgan. 20-shinada esa bu qiymat 188,87 V ga teng bo'lib, og'ish -14,15 % gacha yetgan. Ushbu natijalar tarmoqning uzoq uchastkalarida kuchlanish sifati juda yomonlashganini ko'rsatadi. Shuningdek, 13 va 15-shinalarda ham C fazadagi kuchlanish mos ravishda 208,95 V va 208,58 V bo'lib, kuchlanish og'ishlari -5 % dan pastga tushgan. Mazkur shinalarda nosimmetriya koeffitsienti 3,34 % va 3,35 % ni tashkil etib, ular 16-shinadagi kritik holatning shakllanishida asosiy oraliq nuqtalar ekanligi aniqlangan. Tahlillar asosida eng maqbul texnik yechim sifatida 16-shinning C fazasiga 15 kW quvvatli quyosh elektr stansiyasi ulanishi amalga oshirildi. QES ulangandan keyin tarmoq parametrlari sezilarli darajada yaxshilangani kuzatildi. Jumladan, 16-shinadagi nosimmetriya koeffitsienti 6,01 % dan 2,17 % gacha kamaydi, C fazadagi kuchlanish esa 194,56 V dan 214,19 V gacha oshdi. Shuningdek, 18 va 20-shinalardagi kuchlanish og'ishlari ham -14 % atrofida -5 % chegarasiga yaqinlashdi. Magistral liniyalardagi quvvat isroflari ham keskin kamaydi. Xususan, 0-10 liniyasidagi C fazadagi quvvat isrofi 976,7 W dan 391,7 W gacha, 10-13 liniyasidagi isrof 854,35 W dan 247,91 W gacha, 13-16 liniyasidagi isrof esa 702,81 W dan 135,81 W gacha pasaydi. Noli simdagi toklarning kamayishi esa fazalar orasidagi yuklama muvozanatlashganini ko'rsatdi. Natijada tarmoqdagi umumiy aktiv quvvat isrofi 6300,474 W dan 3316,01 W gacha kamayib, tarmoqning energetik samaradorligi sezilarli oshgani aniqlandi. Demak, olingan natijalar shuni ko'rsatdiki, tarmoqdagi eng muammoli nuqta bo'lgan 16-shinning C fazasiga QES ni optimal tarzda ulash orqali kuchlanish nosimmetriyasi kamayadi, kuchlanish profili barqarorlashadi, noli simdagi tok va aktiv quvvat isroflari sezilarli qisqaradi hamda elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlari yaxshilanadi.



5. Xulosa (Conclusion)

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, 0,4 kV past kuchlanishli elektr tarmog'ida fazalar bo'yicha yuklamalarning notekis taqsimlanishi kuchlanish nosimmetriyasi va quvvat isroflarining ortishiga olib keladi. Ayniqsa, C fazadagi yuklamaning yuqoriligi sababli 0 – 10, 10 – 13 va 13 – 16 liniyalarida katta tok oqimlari hamda yuqori aktiv quvvat isroflari kuzatildi. Natijada tarmoqdagi umumiy aktiv quvvat isrofi 6300,474 W ni tashkil etdi. Tahlillar davomida eng muammoli nuqta sifatida 16-shina aniqlandi. Ushbu shinada kuchlanish nosimmetriyasi koeffitsienti $K_{2U} = 6,01\%$ bo'lib, ruxsat etilgan 4 % chegaradan oshgani kuzatildi. Bundan tashqari, C fazadagi kuchlanish og'ishi –11,56 % ni tashkil etib, elektr energiyasi sifati talablariga mos kelmadi. 16-shinaning C fazasiga 15 kW quvvatli quyosh elektr stansiyasi ulangandan so'ng tarmoq parametrlari sezilarli yaxshilandi. Xususan, umumiy aktiv quvvat isrofi 6300,474 W dan 3316,01 W gacha kamaydi. Shu bilan birga, 16-shinadagi nosimmetriya koeffitsienti 6,01 % dan 2,17 % gacha pasaydi va kuchlanish og'ishlari me'yoriy holatga yaqinlashdi. Olingan natijalar quyosh elektr stansiyalarini past kuchlanishli tarmoqlarga optimal nuqtalarda ulash elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlarini yaxshilashi hamda quvvat isroflarini kamaytirishini ko'rsatdi.

ADABIYOT

1. Рахимов О.С., Мирзоев Д.Н., Грачева Е.И. Экспериментальное исследование показателей качества и потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021;23(3):209-222.
2. Долингер Станислав Юрьевич, Люtareвич Александр Геннадьевич, Горюнов Владимир Николаевич, Сафонов Дмитрий Геннадьевич, Черемисин Василий Титович Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения // ОНВ. 2013. №2 (120).
3. Горбунов Алексей Олегович. Критерий расчёта потерь от несинусоидальных токов в линии // Вестник АГАУ. 2021. №5 (199).
4. Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. О. Горбунов. Снижение потерь мощности от несинусоидальных токов в сельских электрических сетях 0,38 кВ // Известия СПбГАУ. 2019. №2 (55).
5. Геркусов Алексей Анатольевич, Грачева Елена Ивановна, Шумихина Ольга Александровна. Влияние несимметричной нагрузки на потери электроэнергии в распределительных сетях 0,4-20 кВ // Вестник КГЭУ. 2022. №2 (54).
6. Смагин К.А., Галстян Р.А., Антонов М.А., Арнаутов А.В. Анализ влияния несимметрии на потери в сети 0,4 кВ // Молодой исследователь Дона. 2019. №4 (19).
7. Коваленко Дмитрий Валерьевич, Смирнов Павел Сергеевич Учет влияния высших гармоник при расчетах потерь мощности и энергии, возникающих в кабельной линии электропередачи, при подключении к сети группы персональных компьютеров // ОНВ. 2018. №5 (161).
8. Широков О. Г., Алферова Т. В., Алферов А. А., Прусаков С. Л. Оценка потерь электрической энергии, вызванных несинусоидальными режимами, при расчете небалансов системных подстанций 10 кВ // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2015. №1 (60).
9. Пшеничная А.Ю. Анализ влияния качества электроэнергии на потери в распределительных сетях // Синергия наук. 2017. № 14. – С. 400-407.
10. Солнцев Е. Б., Мамонов А. М., Фитасов А. Н. Расчетно-аналитическая модель для исследования влияния распределенной генерации на качество электрической энергии – колебания напряжения // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 3. -С. 13-22.
11. Дед А. В., Паршукова А. В. О способах учета неравномерной нагрузки при расчете потерь мощности // Инновационная наука. 2016. №10-2.
12. Дед А. В., Паршукова А. В. Метод расчета дополнительных потерь мощности при несимметрии режима работы системы электроснабжения // Инновационная наука. 2015. №10-1.
13. Дед Александр Викторович Математическое моделирование расчета потерь мощности в трехфазной сети при несимметрии нагрузки // ОНВ. 2016. №5 (149).
14. Дед Александр Викторович Разработка алгоритма расчета потерь мощности в четырехпроводной трехфазной сети при несимметричной нагрузке // ОНВ. 2016. №5 (149).
15. Xudayarov M.B., Abduxalimov J.A., Oltiboyev D.S. 0,4 kV past kuchlanishli elektr tarmoqlarining turli rejimlarini modellash va tahlil etish. //Energiya va resurs tejash muammolari. 58-68 b. Toshkent 2026.
16. Xudayarov M.B., Abduxalimov J.A. Elektr tarmoqlarida kuchlanish nosinusoidal ligining elektr energiya isroflariga ta'siri. // «Yashil iqtisodiyotni rivojlantirishning tashkiliy-iqtisodiy mexanizmlarini takomillashtirish yo'llari» mavzusidagi xalqaro ilmiy anjuman. 307-309 b. Urganch 2025 y.
17. Xudayarov M.B., Abduxalimov J.A. Taqsimlovchi tarmoq elektr energiyasi isroflariga tarmoq yuklanish koeffitsientining ta'siri. "Innovatsion energetika: energetikaning fundamental asoslari va innovatsion muhandislik yechimlari" Mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy anjuman. 465-468 b. Urganch 2025.



18. Xudayarov M.B., Abduxalimov J.A. Past kuchlanishli tarmoqlarda kuchlanish nosimmetriyasini tahlil qilish. "Innovatsiya-2025" XXIX Xalqaro ilmiy-amaliy anjuman. 163-165 b. Toshkent-2025.
19. Xudayarov M.B., Abduxalimov J.A., Sayimov D.E., Karimov K.Sh. Past kuchlanishli elektr tarmoqlarida elektr energiyasi sifat ko'rsatkichlarining elektr energiya isroflariga ta'sirini baholash va tahlil etishga oid tadqiqotlar sharhi. // Muqobil energetika. 117-124 b. Qarshi-2025.
20. Xudayarov M.B., Abduxalimov J.A. Past kuchlanishli elektr tarmoqlarining turli rejimlarida quvvat isroflarini tahlil etish. // Innovatsion texnologiyalar. 130-137 b. Qarshi - 2025.

REFERENCES

1. Rakhimov, O. S., Mirzoev, D. N., Gracheva, E. I. (2021). Experimental study of power quality indicators and electricity losses in low-voltage rural electrical networks. //Proceedings of the Higher Educational Institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS, 23(3), 209-222.
2. Dolinger, S. Yu., Lyutarevich, A. G., Goryunov, V. N., Safonov, D. G., Cheremisin, V. T. (2013). Assessment of additional power losses from the reduction of electrical energy quality in elements of power supply systems. Omsk Scientific Bulletin (ONV), (2 (120)).
3. Gorbunov, A. O. (2021). Criterion for calculating losses from non-sinusoidal currents in a line. Bulletin of Altai State Agricultural University (Vestnik AGAU), (5 (199)).
4. Kosoukhov, F. D., Vasilyev, N. V., Gorbunov, A. O. (2019). Reducing power losses from non-sinusoidal currents in rural 0.38 kV electrical networks. Izvestiya SPbGAU, (2 (55)).
5. Gerkusov, A. A., Gracheva, E. I., Shumikhina, O. A. (2022). Influence of unbalanced load on electricity losses in 0.4-20 kV distribution networks. Bulletin of KSEU (Vestnik KGEU), (2 (54)).
6. Smagin, K. A., Galstyan, R. A., Antonov, M. A., Arnautov, A. V. (2019). Analysis of the influence of asymmetry on losses in a 0.4 kV network. Young Researcher of the Don, (4 (19)).
7. Kovalenko, D. V., Smirnov, P. S. (2018). Accounting for the influence of higher harmonics in the calculation of power and energy losses occurring in a cable power line when connecting a group of personal computers to the network. Omsk Scientific Bulletin (ONV), (5 (161)).
8. Shirokov, O. G., Alferova, T. V., Alferov, A. A., Prusakov, S. L. (2015). Estimation of electrical energy losses caused by non-sinusoidal modes when calculating the unbalance of 10 kV system substations. Bulletin of GGTU im. P. O. Sukhogo, (1 (60)).
9. Pshenichnaya, A. Yu. (2017). Analysis of the influence of power quality on losses in distribution networks. Synergy of Sciences, (14), 400-407.
10. Solntsev, E. B., Mamonov, A. M., Fitasov, A. N. (2018). Computational and analytical model for studying the influence of distributed generation on electrical energy quality – voltage fluctuations. Intellectual Electrical Engineering, (3), 13-22.
11. Ded, A. V., Parshukova, A. V. (2016). On methods of accounting for uneven load when calculating power losses. Innovative Science, (10-2).
12. Ded, A. V., Parshukova, A. V. (2015). Method for calculating additional power losses in case of asymmetry of the operating mode of the power supply system. Innovative Science, (10-1).
13. Ded, A. V. (2016). Mathematical modeling of power loss calculation in a three-phase network under load asymmetry. Omsk Scientific Bulletin (ONV), (5 (149)).
14. Ded, A. V. (2016). Development of an algorithm for calculating power losses in a four-wire three-phase network with an asymmetrical load. Omsk Scientific Bulletin (ONV), (5 (149)).
15. Khudayarov, M. B., Abdukhalimov, J. A., Oltiboyev D.S. Modeling and Analysis of Various Operating Modes of 0,4 kV Low Voltage Electrical Networks. //Problems of energy and sources saving. 58-68 p. Tashkent 2026.
16. Khudayarov M.B., Abdukhalimov J.A. Effect of voltage non-sinusoidality on electricity losses in electrical networks. /International scientific-practical conference "Ways to improve organizational and economic mechanisms for the development of the green economy", 307-309, Urganch 2025.
17. Khudayarov, M. B., Abdukhalimov, J. A.. Influence of the network load coefficient on electricity losses of the distribution network. International scientific-practical conference "Innovative energy: fundamental basis of energy and innovative engineering solutions", 465-468 p, Urgench 2025.
18. Khudayarov, M. B., Abdukhalimov, J. A. Analysis of voltage asymmetry in low voltage networks. XXIX International scientific conference "Innovation-2025" 163-165 p, Tashkent 2025.
19. Khudayarov, M. B., Abdukhalimov, J. A., Sayimov, D. E., Karimov, K. Sh. Review of studies on assessment and analysis of the influence of power quality indicators on power losses in low-voltage electrical networks. Scientific journal "Alternative Energy", 117-124 p, Karshi 2025.
20. Xudayarov, M. B., Abduxalimov, J. A. Analysis of power losses in different modes of low voltage electrical networks. // Journal "Innovative Technologies", 130-137 p, Karshi 2025.