



УО‘К: 621.311

[https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.3\(24\).2026.13](https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.3(24).2026.13)

NOSIMMETRIYA ROSTLASH QURILMASINI ISHLAB CHIQISH

Shavazov Abdulatif Achilovich¹ - DSc, katta ilmiy xodim,<https://orcid.org/0009-0009-8543-9728> e-mail: abdulatiftshavazov@gmail.comRaximov Mirkamol Farxodjon o‘g‘li^{1,2} - ¹mustaqil izlanuvchi, ²stajyor-o‘qituvchie-mail: raximovmirkamol14@gmail.com¹O‘zR FA Energetika muammolari instituti, Toshkent, O‘zbekiston²Qo‘qon davlat universiteti, Qo‘qon, O‘zbekiston

Annotatsiya. So‘nggi o‘n yillikda quyosh fotoelektr stansiyalari (FES) narxining pasayishi va davlat qo‘llab-quvvatlovi natijasida ularning elektr taqsimlash tarmoqlariga joriy etilishi jadal o‘smoqda. Maqolada uch fazali elektr tarmoqlarida quyosh fotoelektr stansiyalari ishlab chiqargan quvvatni tarmoqqa integratsiya qilish jarayonida yuzaga keladigan kuchlanish nosimmetriyasini kamaytirishga qaratilgan avtomatik qayta taqsimlash qurilmasi ishlab chiqilishi ko‘rib chiqilgan.

Material va usullar. Nosimmetriyani rostlash imkoni beruvchi qurilmalar sifatida uch fazali tizimni muvozanatlash tizimlari, fazani alashtirish va faza tanlash qurilmalari, ikki yoki uch fazali energiya manbai orqali elektr ta‘minoti amalga oshirilgan holatlarda iste‘molchilarga ikki energiya manbaini kuzatuvchi uch fazali va bir fazali avtomatik o‘tkazish qurilmalari, nosimmetriyani nazorat qilish uchun faza tanlagichli samart hisoblagichlari ish rejimlari va ishlash sxemalari tahlil qilindi.

Natijalar. Nosimmetriya kuzatilgan elektr tarmoqlarida bir fazali fotoelektr stansiya energiyasini avtomatik qayta taqsimlash orqali nosimmetriyani rostlash qurilmasi ishlash sxemasi va boshqaruv algoritmlari ishlab chiqildi.

Xulosa. Elektr tarmoqlarida yuzaga kelgan nosimmetriya holatlari va nosimmetriya ko‘satkichlarini bir fazali fotoelektr stansiya ishlab chiqargan energiya sabab ortishini hamda elektr tarmoqlari quvvat isrofini kamaytirish imkoni beruvchi qurilma ishlab chiqilgan. Natijada fazalararo nomutanosiblik, quvvat isroflari va issiqlik yo‘qotishlari kamayadi, tarmoq barqarorligi va energiya sifati yaxshilanadi. Qurilma kichik quvvatli FESlar keng joriy etilayotgan taqsimlangan tarmoqlarda qo‘llanilishi mumkin.

Kalit so‘zlar: uch fazali elektr tarmog‘i, kuchlanish nosimmetriyasi, quyosh fotoelektr stansiyasi, tarmoq invertori, avtomatik qayta taqsimlash, nosimmetriya ko‘rsatkichi, faza kuchlanishi, kommutatsiya.

Дата поступления: 28.08.2026. После обработки: 04.09.2026 Принято печать: 23.09.2026

For citation: Shavozov A.A., Rakhimov M.F. Development of a Device for Asymmetry Regulation. Muqobil energetika. 2026. 3(24). pp. 101-108.

УДК: 621.311

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ НЕСИММЕТРИИ

Шавазов Абдулатиф Ачилович¹-DSc, старший научный сотрудник,<https://orcid.org/0009-0009-8543-9728> e-mail: abdulatiftshavazov@gmail.comРахимов Миркамол Фарходжон угли^{1,2} - ¹независимый исследователь, ²стажер-преподавательe-mail: raximovmirkamol14@gmail.com¹Институт проблем энергетики, Ташкент, Узбекистан²Кокандский государственный университет, Коканд, Узбекистан



Аннотация. В последнее десятилетие в результате снижения стоимости солнечных фотоэлектрических станций (ФЭС) и усиления государственной поддержки наблюдается стремительный рост их внедрения в электрические распределительные сети. В статье рассматривается разработка устройства автоматического перераспределения мощности, направленного на снижение несимметрии напряжения, возникающей при интеграции электроэнергии, вырабатываемой солнечными фотоэлектрическими станциями, в трехфазные электрические сети.

Материалы и методы. В качестве технических средств регулирования несимметрии были проанализированы системы балансировки трехфазных электрических сетей, устройства переключения и выбора фаз, а также трехфазные и однофазные устройства автоматического переключения, обеспечивающие контроль и переключение между двумя источниками электроснабжения при наличии двух- или трехфазного источника энергии. Кроме того, были исследованы режимы работы и функциональные схемы интеллектуальных счетчиков электроэнергии с устройствами выбора фаз, предназначенных для контроля показателей несимметрии напряжения.

Результаты. Разработаны функциональная схема и алгоритм управления устройством регулирования несимметрии в электрических сетях посредством автоматического перераспределения энергии однофазной фотоэлектрической станции между фазами в условиях возникновения несимметрии напряжения.

Заключение. Разработано устройство, позволяющее регулировать возникающую в электрических сетях несимметрию и показатели несимметрии, а также снижать увеличение несимметрии, обусловленное энергией, вырабатываемой однофазной фотоэлектрической станцией, и уменьшать потери мощности в электрических сетях. В результате снижаются межфазный дисбаланс, потери мощности и тепловые потери, повышаются устойчивость электрической сети и качество электроэнергии. Разработанное устройство может применяться в распределительных сетях с широким внедрением малоомощных фотоэлектрических станций.

Ключевые слова: трёхфазная электрическая сеть, несимметрия напряжения, солнечная фотоэлектрическая станция, сетевой инвертор, автоматическое перераспределение, коэффициент несимметрии, фазное напряжение, коммутация.

УДК: 621.311

DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR ASYMMETRY REGULATION

Shavazov Abdulatif Achilovich¹-DSc,

<https://orcid.org/0009-0009-8543-9728> e-mail: abdulatiftshavazov@gmail.com

Rakhimov Mirkamol Farxodjon o'g'li^{1,2} - ¹independent researcher, ²trainee teacher

e-mail: raximovmirkamol14@gmail.com

¹Institute of Problem Energetics, Tashkent, Uzbekistan

²Kokand State University, Kokand, Uzbekistan

Abstract. Over the past decade, the deployment of solar photovoltaic (PV) systems in electrical distribution networks has increased rapidly due to the declining cost of photovoltaic technologies and growing government support. This paper presents the development of an automatic power redistribution device aimed at mitigating voltage unbalance arising from the integration of electricity generated by solar photovoltaic systems into three-phase electrical networks.

Materials and Methods. Various technical solutions for voltage unbalance mitigation were analyzed, including three-phase system balancing systems, phase-switching and phase-selection devices, as well as three-phase and single-phase automatic transfer switching devices designed to monitor and switch between two power sources in electrical supply systems utilizing dual- or three-



phase energy sources. In addition, the operating modes and functional schemes of smart electricity meters equipped with phase-selection devices for monitoring voltage unbalance indices were investigated.

Results. A functional scheme and control algorithm for a voltage unbalance mitigation device were developed. The proposed device enables the automatic redistribution of energy generated by a single-phase photovoltaic station among the phases of an electrical network when voltage unbalance occurs.

Conclusion. A device has been developed to regulate voltage unbalance and its associated indices in electrical networks, mitigate the increase in unbalance caused by the power generated by single-phase photovoltaic stations, and reduce power losses in distribution networks. As a result, phase-to-phase imbalance, power losses, and thermal losses can be reduced, while network stability and power quality are improved. The proposed device can be applied in distribution networks with widespread deployment of small-scale photovoltaic systems.

Keywords: three-phase electrical network, voltage asymmetry, solar photovoltaic station, grid inverter, automatic redistribution, asymmetry coefficient, phase voltage, commutation.

Kirish

So‘nggi yillarda fotoelektr stansiyalarining (FES) elektr taqsimlash tarmoqlariga keng joriy etilishi natijasida uch fazali past kuchlanishli tarmoqlarda fazalar bo‘yicha quvvatning notekis taqsimlanishi va kuchlanish nosimmetriyasi muammosi dolzarb bo‘lib bormoqda [1,3]. Ushbu nosimmetriya neytral sim tokini, quvvat va issiqlik isroflarini oshirishi, elektr energiyasi sifatini pasaytirishi hamda elektr mashinalarining ish samaradorligiga salbiy ta‘sir ko‘rsatishi mumkin [4,7,16]. Nosimmetriyani kamaytirish maqsadida FES inverterlarida reaktiv quvvatni boshqarish, energiya saqlash tizimlaridan foydalanish, elektr prujinalari, Skott transformatorlari, fazalararo dinamik qayta ulash hamda FES va elektromobillarni muvofiqlashtirilgan boshqarish kabi turli yondashuvlar taklif etilgan [1,2,5,6,8-10]. Shuningdek, taqsimlangan energiya resurslarini optimal rejalashtirish, volt-var optimallashtirish, talab tomonini boshqarish va FES integratsiyalashgan tarmoqlarda elektromobil zaryadini muvofiqlashtirish bo‘yicha tadqiqotlar olib borilgan [17-22]. Biroq mavjud yechimlarning aksariyati qo‘shimcha qurilmalarni talab qiladi yoki yuklamalarni qayta taqsimlash va reaktiv quvvatni boshqarishga yo‘naltirilgan. FES tomonidan ishlab chiqarilayotgan aktiv quvvatni fazalar bo‘yicha avtomatik qayta taqsimlash, uning tarmoqqa integratsiya jarayonini hisobga olish va yuzaga keladigan nosimmetriyani birgalikda boshqarish masalalari yetarlicha tadqiq etilmagan.

Shu sababli ushbu ishning maqsadi - FES tomonidan ishlab chiqarilayotgan quvvatni fazalar bo‘yicha avtomatik qayta taqsimlash asosida uch fazali elektr tarmoqlarida kuchlanish nosimmetriyasini kamaytiruvchi, tarmoq barqarorligi va elektr energiyasi sifatini yaxshilashga xizmat qiluvchi qurilma va boshqaruv algoritmini ishlab chiqishdan iborat.

Material va usullar

Uch fazali elektr tarmoqlarida nosimmetriyani kamaytirish bo‘yicha mavjud patent va texnik yechimlarda yuklamalarni fazalar bo‘yicha qayta taqsimlash, fazalarni almashtirish va tanlash, shuningdek, elektr ta‘minoti manbalarini avtomatik boshqarish usullaridan foydalaniladi [11-15]. Mazkur qurilmalar asosan fazalardagi tok va kuchlanish qiymatlarini nazorat qilish hamda yuklamalarni nisbatan kam yuklangan fazaga o‘tkazish orqali tarmoq nosimmetriyasini kamaytirishga qaratilgan.

Biroq mavjud yechimlarda kichik quvvatli quyosh fotoelektr stansiyalarining elektr tarmog‘iga integratsiyasi natijasida yuzaga keladigan nosimmetriya yetarlicha hisobga olinmagan. Xususan, FES ishlab chiqarayotgan quvvatning fazalar bo‘yicha taqsimlanishi, inverterlarning tarmoqqa ulanish vaqti hamda bir nechta FESlarning tarmoqqa birgalikdagi ta‘sirini hisobga olgan holda avtomatik boshqarish algoritmlari to‘liq ishlab chiqilmagan. Shu sababli ayrim hollarda mavjud faza tanlash yoki qayta taqsimlash algoritmlari nosimmetriyani kamaytirish o‘rniga uning ortishiga olib kelishi mumkin.



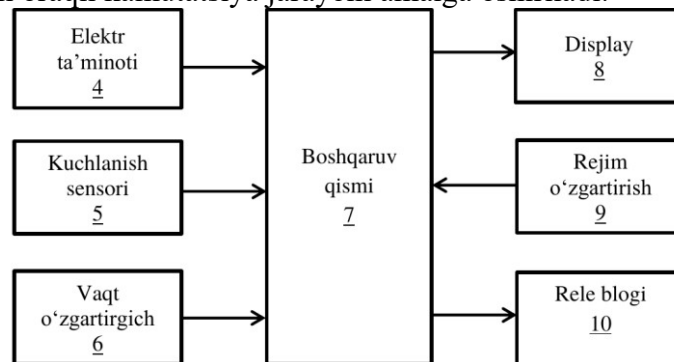
Shu munosabat bilan, qurilmani ishlab chiqishdan maqsad - quyosh fotoelektr stansiyalari quvvatini elektr tarmog'iga optimal tarzda taqsimlash orqali yuzaga keladigan kuchlanish nosimmetriyasini avtomatik rostlash va tarmoq ish rejimining barqarorligini ta'minlashdan iborat.

Qurilmaning asosiy vazifasi - uch fazali elektr tarmog'ida kuchlanish nosimmetriyasini baholash, FES tomonidan ishlab chiqarilayotgan quvvatni fazalar bo'yicha avtomatik qayta taqsimlash va shu orqali fazalararo nomutanosiblik hamda quvvat isroflarini kamaytirishdan iborat.

Tatqiqot natijalari

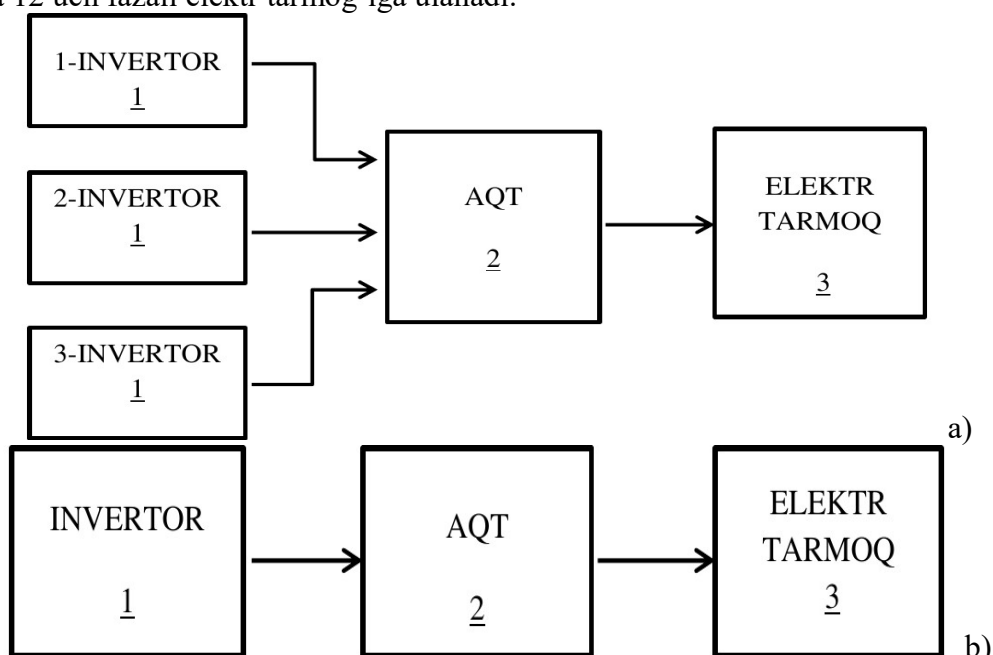
Taklif qilinayotgan qurilma yuqorida keltirilgan vazifalarni 1-rasmda keltirilgan tarkibiy qismlar orqali bajaradi. Qurilma 1 elektr ta'minot qismi, 2 kuchlanish sensorlari, 3 vaqt o'zgartirgich, 4 mikrokontroller, 5 display, 6 rejim o'zgartirgich va 7 komutatsiya qismidan tashkil topgan.

Qurilma ishga tushishi uchun 1 orqali elektr tarmog'iga ulandi, qurilmani mavjud tarmoqqa rejimini sozlash 6 orqali amalga oshirildi va quyosh inverterini tarmoqqa to'la quvvat bilan ishlash vaqtini 3 orqali sozlanadi. Uch fazali tarmoqdagi fazalar kuchlanishlarini doimiy 3 orqali o'lchaydi va ularning orasidagi nosimmetriya darajasini 4 hisoblaydi. O'lchangan qiymatlar va sozlash holatini 5 vizual ko'rsatib turadi. 4 orqali hisoblash natijalari va qabul qilingan qarorlar asosida asosida 7 mavjud relelarini orqali kamutatsiya jarayoni amalga oshiriladi.



1-rasm. Qurilma ichki tuzilishi.

Qurilma 2 ta rejimda ishlaydi ya'ni A va B rejimda. Ushbu rejimlar 7 ga ulangan inverterlar soni bilan farqlanadi. 2-rasmda Avtomatik qayta taqsimlash qurilmasining A va B rejimlari uchun blog sxemasi keltirilgan. 2-rasmdagi 8,9,10,13 fotoelektr stansiyaning bir fazali tarmoqqa quvvat uzatuvchi On-grid inverterlari rejimiga bog'liq holatda 11 ga avtomatik qayta taqsimlash qurilmasi ulanadi. 11 esa 12 uch fazali elektr tarmog'iga ulanadi.



2-rasm. Qurilma A-rejim (a) va B-rejim (b) uchun ishlash prinsipi.



Taklif etilayotgan qurilma nosimmetriyani rostlash uchun A va B rejim uchun alohida ishlash algortimi ishlab chiqilgan. Qurilma boshqaruv algortimi 3-rasmda ikki rejim uchun keltirilgan va ikki rejimda ham qurilma elektr tarmoq parametrlarini aniqlaydi. Keyingi bosqichda qurilma ishlash diapazonlari bo'yicha tekshiradi. Ushbu bosqichda chegaraviy shartlar keltirilgan ya'ni qurilma $U_{inv.min} < U_{o'lchash} < U_{inv.max}$ kuchlanish oralig'ida ishlaydi, aksincha chergaviy kuchlanish qiymatlari belgilangan oralig'ida bo'lmasa qurilma ishlamaydi hamda ushbu bosqichda kuchlanish farqlarining minimal miqdori aniqlanadi hamda o'lchangan kuchlanishlarni qiymatlari asosida kuchlanishlar farqining minimal qiymati aniqlash quyidagi formula orqali amalga oshiriladi:

$$\Delta U_{min} = \min(|U_a - U_b|, |U_a - U_c|, |U_b - U_c|)$$

Bu yerda: U_a, U_b, U_c -faza kuchlanish qiymatlari.

Aniqlangan qiymatni quyidagi shart orqali tekshiriladi:

$$0 < \Delta U_{min.n} < \Delta U_{min.n-1}$$

Agarga shart bajarilmasa qurilma ishlashdan to'xtaydi, aksincha bo'lsa keyingi shartlarga bajarilishi uchun signallar uzatiladi. Ushbu shart kiritilishining asosiy maqsad $U_a = U_b$, $U_a = U_c$, $U_b = U_c$, $U_a = U_b = U_c$ holatlar yuzaga kelganda algaritmning keyingi bosqichlarida faza kuchlanishlarini orasidagi farqni aniqlashda va eng kichik hamda eng katta fazalar qiymatlarni tanlashda ikki yoki uch faza kuchlanishlari bil xil qiymatlaridan chetlatilishi hamda fazalar orasidagi kuchlanishlar farqini kamayish jarayoni kuzatilganligi tekshirish uchun foydalaniladi.

Boshqaruv algortimining keying bosqichida fazalar kuchlanishining tartibini aniqlanadi. Tarmoq kuchlanishlari o'lchangandan so'ng, tizim ushbu kuchlanishlarni o'zaro solishtiradi va ularni kattalik bo'yicha tartiblaydi. A rejim uchun bu jarayon barcha mumkin bo'lgan 6 ta tartib kombinatsiyalarini qamrab oladi. Ular quyidagilar:

1. $U_a < U_b < U_c$;
2. $U_a < U_c < U_b$;
3. $U_b < U_a < U_c$;
4. $U_b < U_c < U_a$;
5. $U_c < U_a < U_b$;
6. $U_c < U_b < U_a$;

Har bir kombinatsiya uchun hisoblash tartibi va qarorlar farq qiladi. Bu tartiblash jarayoni nosimmetriya sharoitida qaysi fazalarda muammo borligini va qaysi fazaga quvvat uzatilishi aniqlashga imkon beradi. Faqat B rejim uchun 4 ta kombinatsiya yetarli hisoblanadi, ya'ni 3 dan 6 gacha bo'lgan kombinatsiyalar.

3-rasmda keltirilgan boshqaruv algoritmi A rejimida nosimmetriya holatini baholash zaruriyati sababli nosimmetriya ko'rsatkichi (K_{ou})ni hisoblanadi. Kuchlanishlar qiymatlariga bog'liq holatda tartiblangan kombinatsiyasi aniqlangach, tizim nosimmetriya ko'rsatkichi – K_{ou} qiymatini hisoblaydi. Bu quyidagi formula asosida bajariladi:

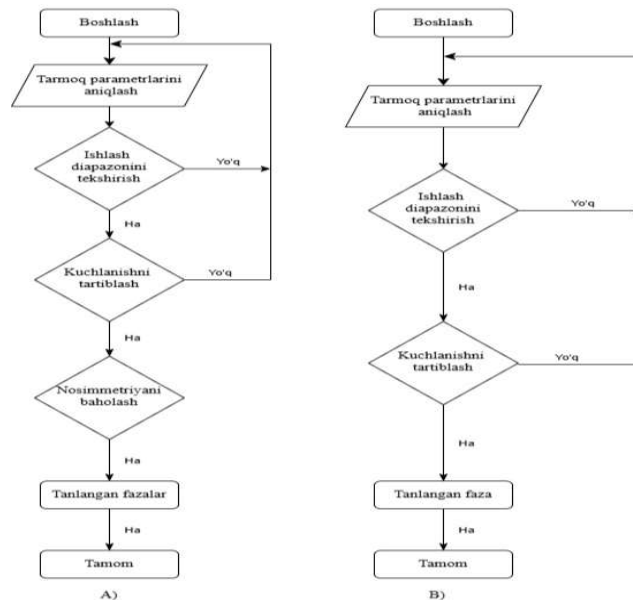
$$K_{ou} = \frac{186 \cdot \max(|U_a - U_b|, |U_a - U_c|, |U_b - U_c|)}{U_a + U_b + U_c}$$

Bu yerda: U_a, U_b, U_c -faza kuchlanish qiymatlari;

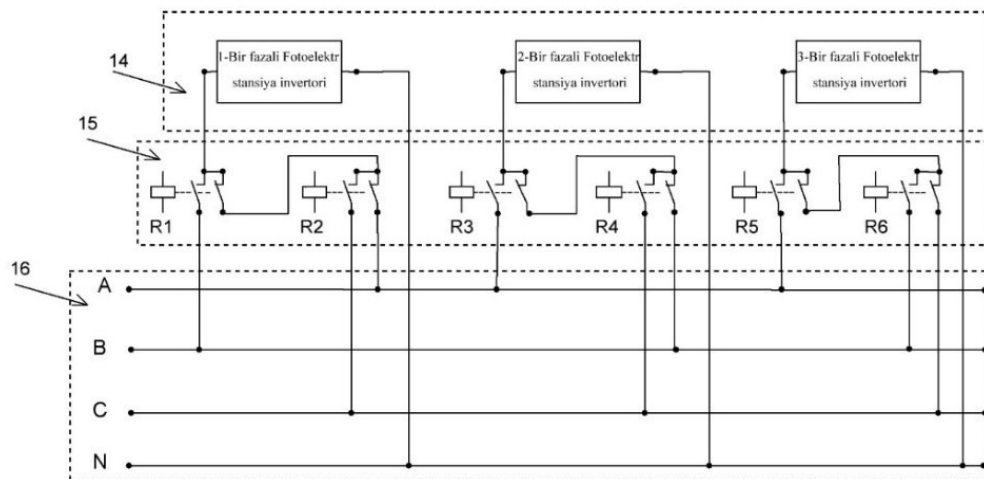
$\max(|U_a - U_b|, |U_a - U_c|, |U_b - U_c|)$ -maksimal faza kuchlanish qiymatlarining farqi.

Bu ko'rsatkich uch fazali tarmoqdagi kuchlanishlar orasidagi nosimmetriya darajasini baholash uchun xizmat qiladi. K_{ou} qiymati qancha katta bo'lsa, tarmoqdagi kuchlanishlarning nosimmetriyasi shunchalik yuqori bo'ladi.

Yuqorida aniqlangan fazalar kuchlanishining kombinatsiyasi va hisoblangan nosimmetriya ko'rsatkichi qiymatlariga bog'liq holatda algoritmi keyingi bosqichdagi shartlarni bajarilishiga signal uzatiladi. Uzatilgan signallar asosida uch fazali tarmoq fazalarining bir tanladi va tanlangan faza komutatsiya qismining tegishli bo'lgan tanlangan faza bilan bo'g'lovchi rele ulanadi. Ulangan rele holati va tarmoq parametrlari displayda ko'rsatiladi.



3-rasm. Qurilmaning boshqaruv algoritmlari (a - A-rejim, b - B-rejim).



4-rasm. Qurilmaning komutatsiya qismi.

4-rasmda Fotoelektr stansiya energiyasini avtomatik qayta taqsimlash qurilmasining komutatsiya qismi keltirilgan bo'lib, A rejimida 14 ning barcha inverterlari shu tartibda ulanadi, 15 orqali 4 dan kelgan signallar asosida 15 ning mavjud relelari ishlaydi va 16 ga quvvat uzatishni boshlaydi. Qurilma B rejimida faqat 14 ning 1-invertori ulanadi, 4 dan kelgan signallar asosida 15 ning 1-invertoriga tegishli bo'lgan relelarini ishlaydi. Qurilmaning umumiy kombinatsiya holatlari A va B-rejimlar uchun 4-rasmda keltirilgan qurilma komutatsiya sxemasi asosida quyidagi 1,2-jadvallarda keltirilgan.

Tatqiqot natijalari tahlili

Ishlab chiqilgan qurilma quyidagi texnik samaralarga erishiladi:

- Fazalar o'rtasidagi kuchlanish nomutanosibligi kamayadi;
- Quvvat isroflari va issiqlik yo'qotishlari kamayadi;
- Quyosh energiyasini tarmoqqa ulash samaradorligi oshadi;
- Elektr tarmog'ining umumiy barqarorligi va energiya sifati yaxshilanadi.

Taklif qilinayotgan qurilma EP3065249A1, KR10-2484100B1, US20120078428A1, EP4576474A1 patentlarda keltirilgan qurilmalardan shu bilan farqlanadiki:

- fotoelektr stansiyalarni elektr tarmog'iga integratsiya vaqtlari induvidual hisobga olishi;
- bir yoki bir nechta bir fazali inverterlarni tarmoqqa ulanish imkonini beruvchi komutatsiya qismi;
- fotoelektr stansiyalari elektr tarmoqlariga integratsiya qilish algoritmlari bilan farqlanadi.



1-jadval

Qurilma A-rejimida kommutatsiya jarayoni

№	Kombinatsiya	$0 < K_{ou} \leq 2$	$2 < K_{ou}$	A faza	B faza	C faza
1.	$U_a < U_b < U_c$	+		R5	-	-
			+	R3+R5	-	-
2.	$U_a < U_c < U_b$	+		R3	-	-
			+	R3+R5	-	-
3.	$U_b < U_a < U_c$	+		-	R6	-
			+		R1+R6	
4.	$U_b < U_c < U_a$	+		-	R1	-
			+	-	R1+R6	-
5.	$U_c < U_a < U_b$	+		-	-	R4
			+	-	-	R2+ R4
6.	$U_c < U_b < U_a$	+		-	-	R2
			+	-	-	R2+ R4

2-jadval

Qurilma B-rejimida kommutatsiya jarayoni

№	Kombinatsiya	B faza	C faza
1.	$U_b < U_a < U_c$	R1	-
2.	$U_b < U_c < U_a$	R1	-
3.	$U_c < U_a < U_b$	-	R2
4.	$U_c < U_b < U_a$	-	R2

Xulosa

Ushbu ishda uch fazali tarmoqlarda FES quvvatini avtomatik qayta taqsimlash orqali kuchlanish nosimmetriyasini rostlovchi qurilma ishlab chiqildi. Qurilma faza kuchlanishlarini o'lchab, ular orasidagi minimal farqni va nosimmetriya ko'rsatkichi K_{ou} ni hisoblaydi hamda inverter quvvatini eng kam yuklangan fazaga yo'naltiradi. A va B rejimlar uchun ikkita boshqaruv algoritmi va rele kommutatsiyasining holatlari aniqlandi. Taklif etilgan yechim FES integratsiya vaqtini hisobga olishi, modulli kommutatsiya qismi va maxsus integratsiya algoritmlari bilan mavjud analoglardan farq qiladi. Natijada fazalararo nomutanosiblik, quvvat isroflari va issiqlik yo'qotishlari kamayadi, tarmoq barqarorligi va energiya sifati yaxshilanadi. Qurilma kichik quvvatli FESlar keng joriy etilayotgan taqsimlangan tarmoqlarda qo'llanilishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar

- [1]. Alabri W., Jayaweera D. Voltage regulation in unbalanced power distribution systems with residential PV systems // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. -2021. - Vol. 131. - Art. 107036.
- [2]. Almazroui A., Mohagheghi S. Coordinated control of electric vehicles and PV resources in an unbalanced power distribution system // Energies. - 2022. - Vol. 15, No. 24. - Art. 9324.
- [3]. Antić T., Capuder T., Bolfek M. A comprehensive analysis of the voltage unbalance factor in PV and EV rich non-synthetic low voltage distribution networks // Energies. - 2021. - Vol. 14, No. 1. - Art. 117.
- [4]. Lee C.-Y. Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three-phase induction motor // IEEE Transactions on Energy Conversion. - 1999. - Vol. 14, No. 2. - P. 202-208.
- [5]. Li Y., Crossley P. A. Voltage balancing in low-voltage radial feeders using Scott transformers // IET Generation, Transmission & Distribution. - 2014. - Vol. 8, No. 8. - P. 1489-1498.
- [6]. Liu X., Aichhorn A., Liu L., Li H. Coordinated control of distributed energy storage system with tap changer transformers for voltage rise mitigation under high photovoltaic penetration // IEEE Transactions on Smart Grid. - 2012. - Vol. 3, No. 2. - P. 897-906.



- [7]. Shahnian F., Wolfs P. J., Ghosh A. Voltage unbalance reduction in low voltage feeders by dynamic switching of residential customers among three phases // IEEE Transactions on Smart Grid. - 2014. - Vol. 5, No. 3. - P. 1318-1327.
- [8]. Taghipour Boroujeni S., Mardaneh M., Hashemi Z. A dynamic and heuristic phase balancing method for LV feeders // Applied Computational Intelligence and Soft Computing. - 2016. - Vol. 2016.
- [9]. Weckx S., Driesen J. Load balancing with EV chargers and PV inverters in unbalanced distribution grids // IEEE Transactions on Sustainable Energy. - 2015. - Vol. 6, No. 2.
- [10]. Yan S., Tan S. C., Lee C. K., Chaudhuri B., Hui S. Y. R. Electric springs for reducing power imbalance in three-phase power systems // IEEE Transactions on Power Electronics. - 2015. - Vol. 30, No. 7. - P. 3601-3609.
- [11]. Phase balancing in three-phase system: patent EP 3065249 A1 [Electronic resource]. – Available at: <https://patents.google.com/patent/EP3065249A1/en>.
- [12]. Phase change type 3-phase current imbalance automatic control device: patent KR 10-2484100 B1 [Electronic resource]. – Available at: <https://patents.google.com/patent/KR102484100B1/en>.
- [13]. Multiphase-to-single-phase automatic transfer switch: patent EP 4576474 A1 [Electronic resource].
- [14]. Smart metering device with phase selector: patent US 20120078428 A1 [Electronic resource]. – Available at: <https://patents.google.com/patent/US20120078428A1/en>.
- [15]. OPEN ACCESS. Submitted 13 June 2025; accepted 09 July 2025; published 11 August 2025.
- [16]. Ugli R. M. F., Ugli Q. A. A., Ugli A. A. V., Qizi K. M. M. Impact of voltage unbalance on distribution transformer efficiency under asymmetric and PV-integrated loads // 2025 14th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). - IEEE, 2025. - P. 810-815.
- [17]. Carpinelli G., Mottola F., Proto D., Varilone P. Minimizing unbalances in low-voltage microgrids: Optimal scheduling of distributed resources // Applied Energy. - 2017. - Vol. 191. - P. 170-182.
- [18]. Islam M. R., Lu H., Hossain J., Islam M. R., Li L. Multiobjective optimization technique for mitigating unbalance and improving voltage considering higher penetration of electric vehicles and distributed generation // IEEE Systems Journal. - 2020. - Vol. 14. - P. 3676-3686.
- [19]. Pijarski P., Kacejko P., Wancierz M. Voltage control in MV network with distributed generation - possibilities of real quality enhancement // Energies. - 2022. - Vol. 15. - Art. 2081.
- [20]. Szultka A., Szultka S., Czapp S., Zajczyk R. Voltage variations and their reduction in a rural low-voltage network with PV sources of energy // Electronics. - 2021. - Vol. 10. - Art. 1620.
- [21]. Then J., Agalgaonkar A. P., Muttaqi K. M. Coordination of spatially distributed electric vehicle charging for voltage rise and voltage unbalance mitigation in networks with solar penetration // 2021 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC). - IEEE, 2021. - P. 1-6.
- [22]. Vijayan V., Mohapatra A., Singh S. N. Demand response with volt/var optimization for unbalanced active distribution systems // Applied Energy. - 2021. - Vol. 300. - Art. 117361.