



Taqsimlangan generatsiya va kompensatsiyalovchi uskunalarga ega 110/35 kv elektr tarmoqlari barqarorlashgan holatlarini tahlil etish

Muzaffar B. Xudayarov^{1, a)}, Nuriddin N. Normamatov²

^{1, a)} DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, 100095, Toshkent, O'zbekiston; muzaffar_hb@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-2829-8980>

²⁾ Muhandis, UzAssystem QK, O'zbekiston, 100060, Toshkent, Mirobod tumani, Shahrisabz ko'chasi, 5A uy; normamatovnuriddin@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-7632-2220>

Dolzarbli: taqsimlovchi elektr tarmoqlari, asosan, radial (ya'ni, yopiq bo'lmagan) konfiguratsiyaga ega bo'lib, an'anaviy tarzda markazlashtirilgan elektr energiyasi ishlab chiqarish va uni ta'minot markazlaridan iste'molchilarga yetkazib berishga tayanib kelgan. Biroq hozirgi kunda qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan, jumladan, quyosh panellari va shamol turbinalaridan foydalanishga asoslangan taqsimlangan generatsiyaning jadal joriy etilishi, shuningdek kuchlanishni tartibga solish va quvvat koeffitsientini yaxshilash, tarmoq samaradorligini oshirish maqsadida kompensatsiyalovchi qurilmalardan, jumladan, kondensator batareyalaridan foydalanish tobora kengaymoqda. Bunday qurilmalarni tarmoqqa joriy etish elektr energiyasi uzatishdagi yo'qotishlarni kamaytirish orqali umumiy samaradorlikni oshirishga xizmat qiladi. Ammo, ayni paytda, taqsimlangan generatsiya elementlari va kompensatsiyalovchi qurilmalarni joriy etish an'anaviy passiv tarmoqlarga qaraganda ochiq taqsimlovchi tarmoqlar rejimlarini tahlil qilishda yangi va murakkab vazifalarni yuzaga keltiradi. Bu yangi elementlar quvvat oqimining ikki yo'nalishda harakatlanishiga, kuchlanish tebranishlariga va tok darajasining o'zgarishiga olib kelishi mumkin. Natijada, mavjud ishlash rejimlari hisoblash metodikalarini qayta ko'rib chiqish va moslashtirish zarurati tug'iladi. Bundan tashqari, qayta tiklanuvchi energiya manbalarining (quyosh, shamol, bioenergiya) o'zgaruvchan va oldindan aniq bashorat qilish qiyin bo'lgan xususiyati sababli, elektr tarmoqlari ishlash rejimlarini doimiy ravishda moslashtirib borish talab qilinadi. Shu munosabat bilan, 110/35 kV elektr tarmoqlari rejimlarini real sharoitlarda modellashtirish va ularni keyinchalik optimallashtirish zarurati ortib bormoqda. Ushbu mavzuning dolzarbli, ayniqsa, O'zbekiston, Markaziy Osiyo va boshqa rivojlanayotgan davlatlarda qayta tiklanuvchi energetika infratuzilmasini kengaytirish bo'yicha strategiyalar amalga oshirilayotgan bir paytda, yanada ortib bormoqda. Elektr tarmoqlarining ishlashini texnik, iqtisodiy va ekologik samaradorlik mezonlari asosida tahlil qilish — hozirgi zamon talablariga mos keluvchi dolzarb ehtiyojdir.

Maqsad: taqsimlangan generatsiya va kompensatsiyalovchi uskunalarga ega 110/35 kVli elektr tarmoqlarida barqarorlashgan holat va elektr energiyasi isroflarini hisoblashdan iborat.

Usullari: tadqiqotda 110/35 kVli ochiq taqsimlovchi elektr tarmoqlari holatlarini hisoblashda ikki bosqichli (teskari va to'g'ri yurishga ega) usuldan, elektr energiyasi yo'qotilishini hisoblashda esa o'rta yuklamalar usulidan foydalanilgan. Tahlil etish uchun to'rt xil holat (hech qanday elementlarsiz, faqat quyosh elektr stansiyasi, faqat Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi va ularning birgalikda ishlashi) ko'rib chiqilgan. Modellashtirish uchun MATLAB dasturlashtirish tizimidan foydalanilgan. Har bir holatda tugunlardagi kuchlanishlar, quvvat va elektr energiyasi yo'qotishlari tahlil etilgan.

Natijalar: tadqiqot natijalariga ko'ra, 110/35 kV elektr tarmoqlarida faqat quyosh elektr stansiyalari yoki faqat reaktiv quvvat manbalari alohida ishlatilgan holatlarda kuchlanish barqarorligida ijobiy o'zgarishlar kuzatildi, biroq eng optimal samaradorlik va minimal energiya yo'qotishlariga QES hamda reaktiv quvvat manbalarining birgalikdagi ishlatilishi orqali erishildi.

Kalit so'zlari: taqsimlangan generatsiya, taqsimlovchi elektr tarmoqlari, qayta tiklanuvchi energiya manbalari, quyosh elektr stansiyasi, reaktiv quvvat kompensatsiyasi, elektr energiyasi yo'qotishlari, modellashtirish.

Анализ установившихся режимов электрических сетей 110/35 кВ с элементами распределённой генерации и компенсирующими устройствами

Музаффар Б. Худаяров^{1, a)}, Нуриддин Н. Нормамаатов²

^{1, a)} DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; muzaffar_hb@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-2829-8980>

²⁾ Инженер, UzAssystem ПК, Узбекистан, 100060, Ташкент, Мирободский район, улица Шахрисабз, дом 5А; normamatovnuriddin@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-7632-2220>

For citation: M.B. Khudayarov, N.N. Normamatov. Analysis of Steady-State Conditions in 110/35 kV Power Networks with Distributed Generation and Compensating Equipment. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 2, pp. 19–28.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15743046>

Received: 15.04.2025

Revised: 29.04.2025

Accepted: 25.05.2025

Published: 24.06.2025

Copyright: © Muzaffar B. Khudayarov, Nuriddin N. Normamatov, 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/>)



Актуальность: распределительные сети, в основном имея радиальную (разомкнутую) конфигурацию, традиционно опирались на централизованное производство и отпуск электроэнергии от центров питания к потребителям. Однако в настоящее время наблюдается существенное внедрение распределенной генерации из возобновляемых источников, таких как солнечные панели и ветрогенераторы, а также все более широкое использование компенсирующих устройств, например, конденсаторных батарей. Их внедрение направлено на регулирование напряжения и коррекцию коэффициента мощности, повышение эффективности сетей за счёт снижения потерь электроэнергии в них. Но при этом, внедрение элементов распределённой генерации и компенсирующих устройств вносит уникальные задачи и сложности в анализ разомкнутых распределительных сетей по сравнению с традиционными пассивными сетями. Эти новые элементы могут приводить к двунаправленным потокам мощности, колебаниям напряжения и изменениям уровней тока, что требует пересмотра и адаптации существующих методик расчета режимов работы. Кроме того, переменный и трудно прогнозируемый характер возобновляемых источников энергии (солнечная, ветровая, биоэнергия) требует постоянной адаптации режимов работы сети. В связи с этим возрастает необходимость анализа режимов работы сетей 110/35 кВ на основе моделирования в реальных условиях для их последующей оптимизации. Актуальность темы особенно высока в условиях реализации стратегий по расширению инфраструктуры возобновляемой энергетики в Узбекистане, странах Центральной Азии и других развивающихся регионах. Анализ функционирования электросетей с учётом технической, экономической и экологической эффективности становится насущной потребностью времени.

Цель: определение установившихся режимов работы и расчёт потерь электрической энергии в распределительных сетях 110/35 кВ, оснащённых элементами распределённой генерации и компенсирующими устройствами.

Методы: в исследовании для расчёта режимов работы открытых распределительных сетей 110/35 кВ использован двухступенчатый метод (прямого и обратного хода), а для определения потерь электроэнергии — метод средних нагрузок. Были рассмотрены четыре различных сценария: без каких-либо элементов; только с солнечной электростанцией; только с источником реактивной мощности и с совместной их работой. Для моделирования использовалась среда программирования MATLAB. В каждом случае проводился анализ уровней напряжения в узлах, мощности и потерь электроэнергии.

Результаты: по результатам исследования установлено, что при отдельном использовании солнечных электростанций или источников реактивной мощности в сетях 110/35 кВ наблюдаются положительные изменения в устойчивости напряжения. Однако наибольшую эффективность и минимальные потери энергии удалось достичь при совместном использовании СЭС и компенсаторов реактивной мощности.

Ключевые слова: распределённая генерация, распределительные электрические сети, возобновляемые источники энергии, солнечная электростанция, компенсация реактивной мощности, потери электрической энергии, моделирование.

Analysis of Steady-State Conditions in 110/35 kV Power Networks with Distributed Generation and Compensating Equipment

Muzaffar B. Khudayarov^{1, a)}, Nuriddin N. Normamatov²

^{1,a)} DSc, Prof., Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, Uzbekistan; muzaffar_hb@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-2829-8980>

²⁾ Engineer, UzAssystem JV, Uzbekistan, 100060, Tashkent, Mirobod district, Shahrisabz street, House 5A; normamatovnuriddin@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-7632-2220>

Relevance: distribution power networks, which are predominantly radial (i.e., open-loop) in configuration, have traditionally relied on centralized electricity generation and its delivery from supply centers to end-users. However, in recent years, there has been a significant increase in the deployment of distributed generation based on renewable energy sources such as solar panels and wind turbines. In parallel, the use of compensating devices—such as capacitor banks—has been expanding to regulate voltage, correct power factor, and improve network efficiency by reducing energy losses. The integration of such devices into the network enhances overall efficiency by minimizing transmission losses. However, the introduction of distributed generation elements and compensating devices presents new and complex challenges for analyzing the operation of open-loop distribution networks, compared to traditional passive systems. These new components may cause bidirectional power flows, voltage fluctuations, and current level variations, necessitating a revision and adaptation of conventional load flow calculation methods. Moreover, the variable and difficult-to-predict nature of renewable energy sources (solar, wind, and bioenergy) requires constant adaptation of network operating conditions. Therefore, there is a growing need for modeling and optimizing the operating modes of 110/35 kV power networks under real conditions. This topic is particularly relevant in Uzbekistan, Central Asia, and other developing countries, where strategies for expanding renewable energy infrastructure are being actively pursued. Analyzing the operation of



power networks from the standpoint of technical, economic, and environmental efficiency has become an essential demand of the present energy transition.

Aim: the main objective of this study is to analyze the steady-state operation and calculate energy losses in 110/35 kV power networks equipped with distributed generation and compensating devices.

Methods: in this study, the operating conditions of open-loop 110/35 kV distribution networks were calculated using a two-stage (forward and backward sweep) load flow method, while energy losses were determined using the average load method. Four operating scenarios were considered: without any elements, with only a solar power plant (SPP), with only a reactive power source, and with both components operating together. MATLAB programming environment was used for modeling. In each scenario, node voltages, power flow, and energy losses were analyzed.

Results: according to the results, the use of either solar power plants or reactive power sources individually in 110/35 kV networks leads to positive changes in voltage stability. However, the highest efficiency and the lowest energy losses were achieved through the combined use of SPP and reactive power compensation devices.

Keywords: distributed generation, distribution power networks, renewable energy sources, solar power plant, reactive power compensation, energy losses, modeling.

1. Kirish (Introduction)

So'nggi o'n yillikda global miqyosda elektr energiyasiga bo'lgan talab keskin ortib bormoqda. Xalqaro energetika agentligining prognozlariga ko'ra, 2040-yilgacha elektr energiyasi iste'moli 60% ga oshishi kutilmoqda [1]. Bu esa mavjud elektr energiyasi ishlab chiqarish va taqsimot tizimlarining samaradorligini oshirish zaruratini yuzaga keltirmoqda. Shu bilan birga, global isish, karbon chiqindilari va ekologik xavfsizlik muammolari ortidan qayta tiklanuvchi energiya manbalariga bo'lgan ehtiyoj ham izchil oshib bormoqda. Ayniqsa, quyosh va shamol kabi manbalar jahon energetika tizimining transformatsiyasida yetakchi o'rin egallamoqda [2].

Biroq, qayta tiklanuvchi energiya manbalari, xususan, quyosh va shamol energiyasining — tabiiy ravishda o'zgaruvchan va beqaror bo'lishi, ularni mavjud elektr tarmoqlariga to'liq va barqaror tarzda integratsiya qilishda sezilarli texnik hamda iqtisodiy muammolarni yuzaga keltiradi. Bu muammolar, eng avvalo, energiya oqimlarining endilikda faqat markazdan emas, balki ikki yo'nalishda — ya'ni, markaziy tizimlardan iste'molchigacha va aksincha, iste'molchidan tarmoqqa qaytadigan shaklda — harakatlanishi zaruratidan kelib chiqadi. Natijada, kuchlanish darajasining vaqt-vaqti bilan o'zgarib turishi, elektr sifatining pasayishi va tarmoq ichidagi yuklamalarning nomutanosib taqsimlanishi holatlari ko'p kuzatiladi. Bundan tashqari, ushbu energiya manbalarining integratsiyasi tizim boshqaruvining ancha murakkab va noaniq tus olishiga olib keladi [3,4]. Ya'ni, tarmoq operatorlari energiya ishlab chiqarish va iste'mol jarayonlarini real vaqt rejimida kuzatish, bashorat qilish va muvozanatlash kabi murakkab vazifalarni bajarishga majbur bo'ladi. Bu esa, o'z navbatida, tizimda zamonaviy monitoring, avtomatlashtirilgan boshqaruv vositalari va aniq modellashirish yechimlarini joriy etishni talab qiladi. Shu sababli, qayta tiklanuvchi energiya manbalarining keng ko'lamda joriy etilishi nafaqat yangi imkoniyatlarni, balki chuqur texnologik islohotlar zaruratini ham yuzaga keltiradi. [5,6].

Bunday sharoitda, ya'ni qayta tiklanuvchi energiya manbalarining tabiiy o'zgaruvchanligi va ularning elektr tarmoqlariga integratsiyasidagi murakkabliklar fonida, taqsimlangan generatsiya (TG) konsepsiyasi tobora ko'proq e'tiborni tortmoqda va u barqaror energiya kelajagi uchun muqobil hamda istiqbolli yechim sifatida qaralmoqda. TG konsepsiyasining markazida elektr energiyasini ishlab chiqarish jarayonini markaziy, yirik elektr stansiyalaridan chetga chiqarish — ya'ni energiyani iste'molchiga yaqin joylashgan, kichik quvvatli, ko'pincha qayta tiklanuvchi manbalarga asoslangan stansiyalar orqali amalga oshirish g'oyasi yotadi [7,8,9].

Ushbu yondashuv bir qancha afzalliklarga ega. Eng avvalo, energiya manbasining iste'molchiga yaqinlashuvi tufayli uzatish yo'qotmalari kamayadi, bu esa tizimning umumiy energetik samaradorligini oshiradi. Shuningdek, lokal ishlab chiqarish punktlari orqali ta'minot qilish tizimni mustahkamroq va bardoshlilikka ega qiladi, ayniqsa favqulodda holatlar yoki markaziy tarmoqlardagi nosozliklar yuzaga kelganda. Bundan tashqari, TG yechimi tizimga yuqori darajadagi moslashuvchanlik olib kiradi, ya'ni turli sharoit va yuklamalarga tezda moslashish imkonini yaratadi [10,11].

TG modeli, shuningdek, aholi va biznes uchun energiya mustaqilligini oshiradi, energiya narxlarini barqarorlashtirishga yordam beradi va mahalliy iqtisodiyot uchun yangi ish o'rinlari yaratish imkoniyatini beradi. Shu bilan birga, TG konsepsiyasi zamonaviy energiya infratuzilmasini talab qiladi, bu esa aqlli tarmoqlar (smart grid), energiya saqlash tizimlari va real vaqt monitoring kabi texnologiyalarning keng qo'llanilishini zarur etadi.

TG tizimlarining asosiy texnologik komponentlari — quyosh panellari, shamol turbinalari va bioenergetik qurilmalar — keng joriy qilinmoqda. Shu bilan birga, ularning elektr tarmoqlariga

ulanishi mavjud tizimlarga sezilarli darajada ta'sir ko'rsatadi. Ilmiy tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, TG manbalari tarmoqqa ulanganida garmoniklar paydo bo'ladi, kuchlanish profilida nomutanosiblik yuzaga keladi hamda tizim barqarorligi susayadi [12].

TG tizimlarining barqaror va samarali ishlashi uchun reaktiv quvvatni me'yorda ta'minlash hal qiluvchi ahamiyatga ega. Ayniqsa qayta tiklanuvchi energiya manbalari asosida ishlovchi tizimlar (quyosh panellari, shamol turbinalari va boshqalar), bu borada muayyan cheklovlarga ega. Masalan, quyosh panellari odatda doimiy tok ishlab chiqaradi va ularni tarmoqqa ulanadigan invertorlar orqali uzatiladigan toklar esa reaktiv quvvatni mustaqil ravishda ishlab chiqara olmaydi yoki ishlab chiqarsa ham bu quvvat doimiy emas, tarmoq sharoitiga bog'liq bo'ladi [13].

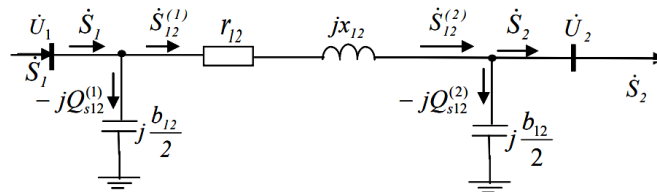
Shu sababli, reaktiv quvvat kompensatsiyasi TG tizimlarida muhim funksiyalardan biriga aylanadi. Tarmoqdagi yuklamaning o'zgarishi, quyosh yoki shamol resurslarining vaqtinchalik kamayishi yoki ortishi sharoitida kuchlanishni ushlab turish uchun qo'shimcha reaktiv quvvat manbalariga ehtiyoj tug'iladi. Aks holda, tizimda kuchlanish pasayishi (undervoltage), garmonik buzilishlar va hatto faol quvvat uzatilishida yo'qotishlarning ortishi kabi salbiy oqibatlar kuzatiladi [14].

TG tizimlarining samarali ishlashi va uzoq muddatli barqarorligi uchun ushbu qurilmalarning o'zaro uyg'un ishlashi muhimdir. Aks holda, qayta tiklanuvchi manbalar ulkan salohiyatiga qaramasdan, mavjud elektr tarmoqlari bilan integratsiyada muammolar yuzaga kelishi mumkin [15,16].

Markazlashtirilmagan energiya ishlab chiqarish tizimlarida reaktiv quvvat manbalarining joylashtirilishi va boshqaruvi elektr tarmog'ining samaradorligi va barqarorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Ilmiy manbalarda qayd etilishicha, bunday integratsiya energiya ta'minoti tizimining ishonchligini oshiradi, energiya yo'qotishlarini kamaytiradi va ekologik barqarorlikni ta'minlashga xizmat qiladi [17].

2. Materiallar va usullar (Materials and Methods)

Ushbu bo'limda elektr energiya uzatish liniyasining π -modeli asosida quvvat oqimini hisoblash usuli bayon qilinadi. Hisoblashda uzatish liniyasining almashtirish sxemasi (1-rasm)dan foydalaniladi. EULning holatini oxirida yuklama va boshlanishida kuchlanish berilganda hisoblash (liniyaning almashtirish sxemasi, barcha hisob parametrlari va \dot{S}_2 hamda \dot{U}_1 lar berilgan). Ushbu holda liniyaning holatini hisoblash natijasida uning boshlanishidagi quvvat, oxiridagi kuchlanish, almashtirish sxemasi bo'yilama qismining oxiri va boshlanishidagi quvvatlar hamda quvvatlar isroflari topiladi.



1-rasm. EUL holatini yuklama quvvati va kuchlanishi berilganda hisoblash

Fig. 1. Power flow calculation under EUL conditions with given load power and voltage

Ushbu holda liniyaning holatini ifodalovchi tenglama egri chiziqli ko'rinishda bo'ladi va shu sababli u ketma-ket yaqinlashish usullaridan foydalanib hisoblanadi.

2-tugun uchun egri chiziqli tugun kuchlanishlari tenglamasi quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$Y_{22}\dot{U}_2 + Y_{12}\dot{U}_1 = \dot{I}_2(U)_2 = \frac{\dot{S}_2}{\dot{U}_2} \quad (2.1)$$

Bu tenglamani yechib, noma'lum \dot{U}_2 ni topish va so'ngra yuqoridagi formulalar bo'yicha barcha quvvatlarni hisoblash mumkin. Biroq ochiq elektr tarmoqlari holatlarini, jumladan ushbu tarmoq holatini hisoblash uchun nisbatan sodda bo'lgan «ikki bosqichli» usuldan foydalanish maqsadga muvofiq. Ushbu usul bo'yicha hisoblash tartibi bilan tanishamiz.

1-bosqich. $\dot{U}_2 = U_n$ deb qabul qilib, oldingi holatdagi tartibda quvvat oqimlari va isroflarini hisoblaymiz:

$$Q_{s12}^{(2)} = \frac{1}{2}U^2 b_{12}; \quad \dot{S}_{12}^{(2)} = \dot{S}_2 + jQ_{s12}^{(2)}; \quad \Delta\dot{S}_{12} = \frac{\dot{S}_{12}^{(2)2}}{U_N^2} Z_{12}; \quad (2.2)$$

$$\dot{S}_{12}^{(1)} = \dot{S}_{12}^{(2)} + \Delta\dot{S}_{12}; \quad Q_{s12}^{(1)} = \frac{1}{2}U_1^2 b_{12}; \quad \dot{S}_1 = \dot{S}_{12}^{(1)} - jQ_{s12}^{(1)}. \quad (2.2)$$

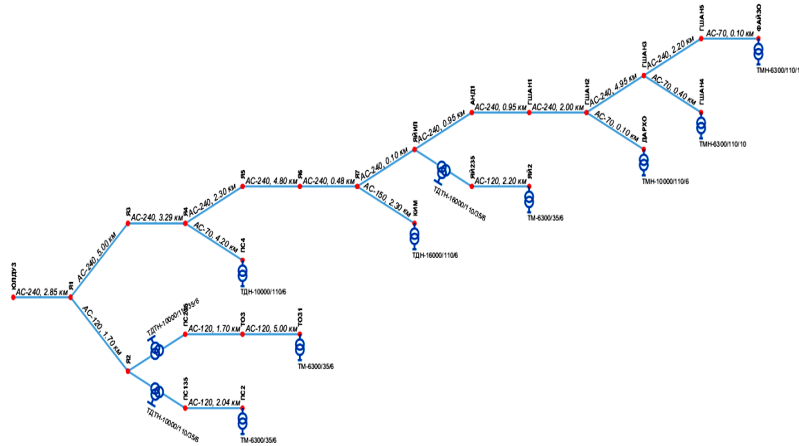
2-bosqich. 1-bosqichda topilgan quvvat oqimi $\dot{S}_{12}^{(1)}$ dan foydalanib, Om qonuni bo'yicha \dot{U}_2 kuchlanishni aniqlaymiz. Bunda tok \dot{I}_1 ni $\dot{S}_{12}^{(1)}$ va \dot{U}_1 lar orqali ifodalaymiz:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \sqrt{3}\dot{I}_{12}Z_{12} = \dot{U}_1 - \frac{\dot{S}_{12}^{(1)}}{\dot{U}_1} Z_{12}. \quad (2.3)$$

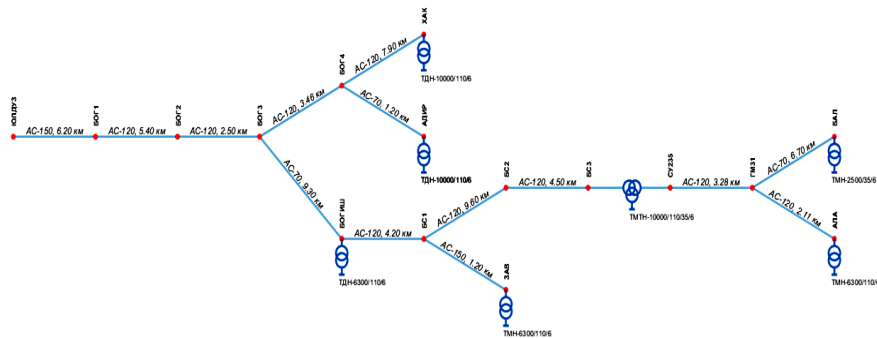
Yuqoridagi formulalarda \dot{U}_2 ning o'rnida U_N foydalanilganligi sababli 1-bosqichda quvvat

oqimlari va bunga mos ravishda 2-bosqichda kuchlanish \dot{U}_2 larning topilgan qiymatlari taxminiy bo'ladi. Ularning aniq qiymatlarini topish uchun yuqoridagi formulalarda \dot{U}_2 ning o'rniga uning topilgan qiymatini qo'yib hisoblashni takrorlash lozim. Takroriy hisoblashlarni bir necha marta amalga oshirib, talab etilgan aniqlikdagi natijani olish mumkin. Buhisoblashlarni MATLAB dasturida amalga oshirilgan.

Ushbu tadqiqotda asosiy ob'ektlari sifatida 110/35 kV kuchlanishli taqsimlovchi elektr tarmoqlari tanlab olindi. Bu tarmoqlar zamonaviy elektr energiya tizimlarida qayta tiklanuvchi energiya manbalari, xususan, quyosh elektr stansiyalari (QES) va reaktiv quvvat kompensatsiyalovchi qurilmalar bilan integratsiyalashuvining samaradorligini baholash uchun o'rganildi.



2-rasm. 40 tugundan iborat elektr sistemasi
Fig. 2. Power system consisting of 40 nodes



3-rasm. 22 tugundan iborat elektr sistemasi
Fig. 2. Power system consisting of 22 nodes

Tadqiqot doirasida 40 va 22 tugundan iborat bo'lgan 110/35 kVli taqsimot tarmog'i modeli tuzildi va MATLAB dasturi yordamida turli ish holatlarida tahlil qilindi.

40 va 22 tugundan iborat bo'lgan elektr tarmog'ida quyidagi to'rtta holat modellashtirildi:

- 1-holat – Taqsimlangan generatsiyasiz, faqat mavjud elektr tarmog'i holati (nazorat guruhi).
- 2-holat – Tarmoqqa faqat QES ulangan holat.
- 3-holat – Tarmoqqa faqat Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi ulangan holat.
- 4-holat – QES va Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi birgalikda ulangan holat.

Har bir holatda tugunlardagi kuchlanishlar, reaktiv va aktiv quvvat taqsimoti tahlil qilinib, tizim barqarorligiga ta'siri baholandi.

3. Natijalar (Results)

110/35 kV kuchlanishli, 22 va 40 tugundan iborat elektr tarmoqlarida TG sharoitida quyosh elektr stansiyasi (QES) va reaktiv quvvat manbasining tizimga ta'siri o'rganildi. (1-rasm) Bu sxema MATLAB dasturi yordamida barqarorlashgan holatlar 4 ta holat uchun hisob kitob qilindi.

a) 40 tugundan iborat elektr tarmoqlarida 4 ta holat quyidagicha:

1 – holat: Tanlangan elektr sistemasida Taqsimlangan generatsiya yo'q holati

2 – holat: Taqsimlangan generatsiya 11 – 25 – 36 tugunlarda QES bor holati. Ularning quvvati quyidagicha:

- 11 – tugunda $P_{10}=4000$ kVt;
- 25 – tugunda $P_{24}=6000$ kVt;



- 36 – tugunda P35=6000 kVt.
- 3 – holat: Taqsimlangan generatsiya 11 – 25 – 36 tugunlarda Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi bor holati. Ularning quvvati quyidagicha:
 - 11 – tugunda Q10=2000 kVar;
 - 25 – tugunda Q24=3000 kVar;
 - 36 – tugunda Q35=4000 kVar.
- 4 – holat: Taqsimlangan generatsiya 11 – 25 – 36 tugunlarda QES va Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi bor holati. Ularning quvvati quyidagicha:
 - 11 – tugunda P10=4000 kVt;
 - 25 – tugunda P24=6000 kVt;
 - 36 – tugunda P35=6000 kVt;
 - 11 – tugunda Q10=2000 kVar;
 - 25 – tugunda Q24=3000 kVar;
 - 36 – tugunda Q35=4000 kVar.

4 ta holat uchun kuchlanishning nisbiy birlikdagi qiymatlari 1 – jadvalda keltirilgan.

Jadval.1. Kuchlanishning nisbiy birlikdagi qiymatlari

Table 1. Per-unit values of voltage.

Tugun	(1-holat) Taqsimlangan generatsiya yo'q holati	(2-holat) Taqsimlangan generatsiya QES bor holati	(3-holat) Taqsimlangan generatsiyada Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi bor holati	(4-holat) Taqsimlangan generatsiya QES va Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi bor holati
№	U (p.u)	U (p.u)	U (p.u)	U (p.u)
1.	1,06	1,06	1,056	1,056
2.	1,055	1,056	1,055	1,056
3.	1,054	1,055	1,053	1,090
4.	1,052	1,053	1,090	1,089
5.	1,089	1,089	1,088	1,104
6.	1,087	1,088	1,100	1,049
7.	1,099	1,100	1,048	1,044
8.	1,041	1,042	1,039	1,037
9.	1,029	1,034	1,028	0,921
10.	1,015	1,024	0,913	1,049
11.	0,894	0,903	1,042	1,042
12.	1,050	1,051	1,035	1,043
13.	1,046	1,047	1,083	1,039
14.	1,044	1,046	1,031	1,038
15.	1,038	1,040	1,029	1,032
16.	1,043	1,045	0,917	1,037
17.	1,037	1,040	1,034	1,085
18.	1,032	1,035	1,032	1,033
19.	1,031	1,034	1,032	0,919
20.	1,025	1,028	1,031	1,036
21.	1,029	1,033	1,031	1,035
22.	1,074	1,078	1,017	1,035
23.	1,020	1,024	1,030	1,034
24.	1,017	1,022	1,029	1,034
25.	0,896	0,901	0,888	1,033
26.	1,029	1,032	1,037	1,038
27.	1,028	1,032	1,084	1,033
28.	1,025	1,029	1,030	1,034
29.	1,025	1,029	1,032	1,056
30.	1,013	1,017	1,056	1,056
31.	1,023	1,028	1,055	1,090
32.	1,023	1,028	1,053	1,089
33.	1,010	1,014	1,090	1,104
34.	1,022	1,027	1,088	1,049
35.	1,021	1,026	1,103	1,044
36.	0,867	0,873	1,048	1,037
37.	1,031	1,035	1,039	0,921
38.	1,083	1,084	1,028	1,049
39.	1,022	1,027	0,913	1,042
40.	1,024	1,029	1,042	1,043



b) Shuningdek 22 tugundan iborat elektr tarmoqda (2-rasm) 4 xil ish rejimida elektr Sistema parametrlari hisoblab chiqilgan va quyidagi natijalar olingan:

1 – holat: Tanlangan elektr sistemasida Taqsimlangan generatsiya yo'q holati;

2 – holat: Taqsimlangan generatsiya 14 tugunlarda QES bor holati. Ularning quvvati quyidagicha:

➤ 14 – tugunda $P_{14}=5000$ kVt.

3 – holat: Taqsimlangan generatsiya 14 tugunlarda Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi bor holati. Ularning quvvati quyidagicha:

➤ 14 – tugunda $Q_{14}=2000$ kVar.

4 – holat: Taqsimlangan generatsiya 14 tugunlarda QES va Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi bor holati. Ularning quvvati quyidagicha:

➤ 14 – tugunda $P_{14}=5000$ kVt, $Q_{14}=2000$ kVar.

4 ta holat uchun kuchlanishning nisbiy birlikdagi qiymatlari 2 – jadvalda keltirilgan.

2-Jadval. Kuchlanishning nisbiy birlikdagi qiymatlari

Table 2. Per-unit values of voltage

Tugun	(1-holat) Taqsimlangan generatsiya yo'q holati	(2-holat) Taqsimlangan generatsiya QES bor holati	(3-holat) Taqsimlangan generatsiyada Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi bor holati	(4-holat) Taqsimlangan generatsiya QES va Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi bor holati
№	U (p.u)	U (p.u)	U (p.u)	U (p.u)
1.	0,994	0,995	0,994	0,995
2.	0,976	0,980	0,977	0,981
3.	0,973	0,977	0,975	0,979
4.	0,972	0,976	0,974	0,978
5.	0,976	0,980	0,977	0,981
6.	0,955	0,964	0,991	1,00
7.	0,966	0,970	0,968	0,972
8.	0,965	0,969	0,966	0,970
9.	0,963	0,968	0,965	0,969
10.	0,963	0,967	0,964	0,968
11.	0,951	0,955	0,952	0,957
12.	0,988	0,989	0,989	0,990
13.	0,963	0,967	0,964	0,968
14.	0,951	0,955	0,953	0,957
15.	0,973	0,975	0,974	0,975
16.	0,986	0,987	0,986	0,988
17.	0,984	0,985	0,984	0,986
18.	0,982	0,983	0,982	0,984
19.	0,953	0,955	0,954	0,956
20.	0,983	0,985	0,984	0,986
21.	0,9780	0,981	0,979	0,982
22.	0,939	0,943	0,941	0,944

4. Muhokama (Discussion)

a) 110/35 kV kuchlanishli, 40 tugundan iborat elektr tarmog'ini uchun to'rtta turli energetik holatdagi kuchlanish profillari tahlil qilindi. Har bir holatda tugun kuchlanishining nisbiy birlikdagi qiymatlari (p.u) taqqoslandi va quyidagi asosiy natijalar aniqlandi:

1-holat (*Taqsimlangan generatsiyasiz holat*) – Bu holatda tizimda taqsimlangan generatsiya mavjud emasligi sababli kuchlanish boshqarilmaydi. Natijada, ayrim tugunlarda kuchlanishning biroz pasayishi yoki nomutanosib taqsimlanishi kuzatilgan. Bu holat tizimning mustaqil ishlash qobiliyati pastligini va markaziy ta'minotga kuchli qaramligini ko'rsatadi. Jumladan, 11-, 25- va 36-tugunlarda kuchlanish tegishli ruhsat etilgan chegaralardan past bo'lib, mos ravishda 0.894 p.u., 0.896 p.u. va 0.867 p.u.ni tashkil etgan.

2-holat (*Taqsimlangan generatsiyada QES mavjud holat*) – Ushbu holatda tizimda faol generatsiya mavjudligi kuchlanishni nisbatan barqarorlashtirgan. Biroq, reaktiv quvvatning yetarli bo'lmashligi kuchlanish darajasining optimal chegaralarga chiqishiga to'sqinlik qilgan. Ayniqsa, 36-tugunda kuchlanish 0.873 p.u. bo'lib, u ruhsat etilgan minimum qiymatdan past bo'lgan.

3-holat (*Taqsimlangan generatsiyada faqat Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi mavjud holat*) – Bu holatda faqat reaktiv quvvat manbai mavjud bo'lib, tizimda kuchlanishning ancha



yaxshilanganligi kuzatiladi. Bu holat reaktiv quvvatning elektr tarmog'ida barqaror kuchlanish ta'minlashdagi muhim rolini yaqqol ko'rsatadi. 25-tugunda kuchlanish 0.888 p.u. ni tashkil etib, hali ham belgilangan minimal chegaradan past bo'lsa-da, oldingi holatlarga nisbatan yaxshilanish mavjud.

4-holat (Taqsimlangan generatsiyada QES va Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi birgalikda mavjud holat) – Bu holat eng samarali bo'lib, kuchlanishning ortiqcha ko'tarilishi kuzatilgan: 5-tugunda 1.108 p.u., 33-tugunda esa 1.104 p.u. Bu qiymatlar ruxsat etilgan yuqori chegaradan oshgan. Shuning uchun taqsimlangan generatsiya va reaktiv quvvat manbalarining quvvatini aniq hisoblash va ularni tizimga kerakli quvvat ulash muhimligi ko'rsatdi.

Tadqiqot doirasida shuningdek, 4 xil ish rejimida elektr energiyasi isroflari (yo'qotishlari) hisoblab chiqildi. Quyidagi natijalar olingan:

- **1-holat (generatsiyasiz):** Umumiy energiya yo'qotishlari 22 104 kVt·soatni tashkil etdi. Bu tizimda hech qanday qo'shimcha quvvat manbasi ishlamayotgan holatdagi eng yuqori yo'qotish ko'rsatkichidir.

- **2-holat (faqat QES mavjud):** Yo'qotishlar 13 416 kVt·soatga tushdi, bu 1-holatga nisbatan 39.3% kamayish demakdir. Bu quyosh elektr stansiyalarining tarmoqdagi aktiv quvvat yukini kamaytirishdagi samaradorligini ko'rsatadi.

- **3-holat (faqat Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi):** Yo'qotishlar 19 224 kVt·soatni tashkil etdi. Bu 1-holatga nisbatan 13% kamayish bo'lib, reaktiv quvvat kompensatsiyasining energiya yo'qotishlariga ijobiy ta'sirini bildiradi.

- **4-holat (QES + Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi):** Eng samarali natija kuzatildi — yo'qotishlar 10 776 kVt·soatga tushdi. Bu esa 1-holatga nisbatan 51.2% kam energiya isrofi demakdir.

b) 110/35 kV kuchlanishli, 22 tugundan iborat elektr tarmog'i uchun to'rtta turli energetik holatdagi kuchlanish profillari tahlil qilindi. Har bir holatda tugun kuchlanishining nisbiy birlikdagi qiymatlari (p.u) taqqoslandi va quyidagi asosiy natijalar aniqlandi:

1-holat: Taqsimlangan generatsiyasiz holat: Tizim faqat markaziy manbaga tayanib ishlamoqda. Eng past kuchlanish 22-tugunda kuzatilib, atigi 0.939 p.u ni tashkil etdi. 3-, 4-, 9-, 10-, va 13-tugunlarda kuchlanish 0.970 p.u dan past. Bu holat tarmoqda kuchlanish barqarorligining zaifligini va markaziy manbaga kuchli qaramlik mavjudligini ko'rsatadi. Umuman olganda, tizimda kuchlanish pasayishi xavfi yuqori.

2-holat: QES mavjud holat: Quyosh generatsiyasi tizimga qo'shilganda kuchlanish profili biroz yaxshilandi. 22-tugundagi kuchlanish 0.943 p.u ga oshgan. Aksariyat tugunlarda kuchlanish 0.95 p.u dan yuqori bo'lib, bu QES tizimga ijobiy ta'sir ko'rsatganini bildiradi. Biroq, reaktiv quvvatning yetishmasligi bois kuchlanish darajasida barqarorlik to'liq ta'minlanmagan.

3-holat: Faqat reaktiv quvvat mavjud holat: Reaktiv quvvat kompensatsiyasi kuchlanishni sezilarli yaxshilagan. 22-tugundagi kuchlanish 0.944 p.u bo'lib, eng past nuqtalarda ham pasayish kamaygan. Ko'pgina tugunlarda kuchlanish 0.97–0.99 p.u oralig'ida bo'lib, tizimda kuchlanishning barqaror taqsimoti kuzatilmoqda. Bu reaktiv quvvat ta'minotining elektr tarmog'i sifatiga kuchli ta'sirini tasdiqlaydi.

4-holat: QES va reaktiv quvvat mavjud holat: Eng yaxshi natijalar ushbu holatda kuzatildi. 22-tugundagi kuchlanish 0.944 p.u, barcha tugunlar bo'yicha kuchlanish 0.974–1.023 p.u oralig'ida barqaror taqsimlangan. QES va reaktiv quvvatning uyg'un ishlashi tarmoqda eng yuqori darajadagi kuchlanish barqarorligi va minimal yo'qotishlar rejimi holati ta'minlagan.

Shuningdek 4 xil ish rejimida elektr energiyasi isroflari (yo'qotishlari) hisoblab chiqildi. Quyidagi natijalar olingan:

- **1-holat (generatsiyasiz):** Umumiy energiya yo'qotishi 15600 kVt·soatni tashkil etib, bu tizimda hech qanday qo'shimcha quvvat manbasi ishlamayotgan holatdagi eng yuqori yo'qotish darajasidir.

- **2-holat (faqat QES mavjud):** Yo'qotishlar 11520 kVt·soat gacha kamaygan bo'lib, bu 2-holatda 26.15% ga kamayishni anglatadi. Quyosh generatsiyasi elektr energiyasi oqimini engillashtirib, tizim samaradorligini oshirgan.

- **3-holat (faqat Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi):** Yo'qotishlar 15120 kVt·soatni tashkil etib, bu 1-holatga nisbatan 3.08% ga kamaygan. Reaktiv quvvat kompensatsiyasi energiya oqimini muvozanatlashga yordam bergan.

- **4-holat (QES + Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi):** Eng yaxshi natija ushbu holatda kuzatildi — energiya yo'qotishlari 11040 kVt·soat gacha tushgan bo'lib, bu 1-holatga nisbatan 29.23% kam energiya isrofini anglatadi. QES va reaktiv quvvatning birgalikdagi ishlashi tizim samaradorligini sezilarli darajada oshirgan.

Ushbu natijalar shuni ko'rsatadiki, taqsimlangan generatsiyani tizimga integratsiyalash, ayniqsa quyosh elektr stansiyalari va reaktiv quvvat manbalarini birgalikda qo'llash, elektr tarmoqlaridagi energiya yo'qotishlarini sezilarli darajada kamaytiradi. Bu esa nafaqat energiyaning samarali taqsimlanishini, balki umumiy tizim iqtisodiyoti va ekologik barqarorlikni ham yaxshilashga xizmat qiladi.



5. Xulosa (Conclusions)

Tadqiqot davomida 40 va 22 tugunli 110/35 kV kuchlanishli elektr tarmoqlarida taqsimlangan generatsiya sharoitida turli ishlash holatlari modellashtirilib, qayta tiklanuvchi energiya manbalari va reaktiv quvvat kompensatorlarining tizimga ko'rsatadigan ta'siri o'rganildi. Tahlil qilingan to'rtta holat (generatsiyasiz, faqat QES, faqat Reaktiv quvvat kompensatsiya qurilmasi, va ularning birgalikdagi ishlashi) asosida olingan natijalar shuni ko'rsatdiki, har bir komponent alohida qo'llanilganda ma'lum darajada ijobiy natijalar kuzatilgan bo'lsada, eng yuqori kuchlanishning barqarorligi va minimal energiya yo'qotishlariga faqat QES va reaktiv quvvat manbalari kompleks tarzda ishlatilganda erishiladi.

Xususan, kuchlanish profili tahlilida ko'plab tugunlarda kuchlanish darajasining oshgani, tizimning o'z-o'zini barqarorlashtirish qobiliyati kuchaygani aniqlandi. Reaktiv quvvat kompensatsiyasi tizimda kuchlanish pasayishini oldini olishda va yuklamani teng taqsimlanishini ta'minlashda muhim rol o'ynadi. Shu bilan birga, QES orqali ishlab chiqarilgan aktiv quvvat tarmoqdagi markaziy yuklamani kamaytirib, energiya oqimini soddalashtirdi. Shuningdek, taqsimlangan generatsiya va reaktiv quvvat manbalarining quvvatini aniq hisoblash hamda ularni tizimga texnik talablar asosida va optimal quvvatda ulash zarurligi yaqqol namoyon bo'ldi. Bu esa barqaror va samarali elektr ta'minotini ta'minlashda asosiy omillardan biridir.

ADABIYOT

1. International Energy Agency (IEA). (2022). World Energy Outlook 2022. Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.
2. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). Renewable Capacity Statistics 2023. Abu Dhabi: IRENA. <https://www.irena.org/Statistics>.
3. Moreno, R., Moreira, R., & Rudnick, H. (2020). Integration of renewable energy sources into the electrical grid: Technical and economic challenges. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(1), 27–36. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2926520>.
4. Chen, H., Gooi, H. B., & Wang, M. Q. (2015). Sizing of energy storage for microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1), 238–248. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2411434>.
5. Liserre, M., Sauter, T., & Hung, J. Y. (2011). Future energy systems: Integrating renewable energy sources into the smart power grid through industrial electronics. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 4(1), 18–37. <https://doi.org/10.1109/MIE.2010.935861>.
6. E. Ela, V. Diakov, E. Ibanez, and M. Heaney, "Impacts of Variability and Uncertainty in Solar Photovoltaic Generation at Multiple Timescales", *National Renewable Energy Laboratory* pp.9-10. May 2023.
7. Zhang, Y., Li, G., & Wang, L. (2017). Optimization of reactive power and energy loss in smart grid environments. *Energy Procedia*, 141, 413–418. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.105>.
8. Pérez, C., Reinoso, M., & Lobato, E. (2019). Reactive power compensation techniques and applications in power distribution networks: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 423–435. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.005>.
9. Hatziargyriou, N. D., Asano, H., Iravani, R., & Marnay, C. (2007). Microgrids: An overview of ongoing research, development, and demonstration projects. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(4), 78–94. <https://doi.org/10.1109/MPAE.2007.376583>.
10. Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., de Vicuña, L. G., & Castilla, M. (2011). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158–172. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534>.
11. Karanki, S. B., Geddada, N., Mishra, M. K., & Kumar, B. K. (2014). A modified three-phase four-wire UPQC topology with reduced DC-link voltage rating. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(9), 3555–3566. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2216231>.
12. Abarzadeh, M., & Ranjbar, A. M. (2014). Optimal reactive power planning in distribution networks with distributed generators using a multi-objective approach.
13. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 63, 475–482. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.005>.
14. Hung, D. Q., Mithulananthan, N., & Bansal, R. C. (2014). Analytical expressions for DG allocation in primary distribution networks. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29(2), 507–516. <https://doi.org/10.1109/TEC.2014.2302331>.



15. Civanlar, S., Grainger, J. J., Yin, H., & Lee, S. S. H. (1988). Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3), 1217–1223. <https://doi.org/10.1109/61.193906>.
16. Bansal, R. C. (2005). Automatic reactive power control of autonomous hybrid power systems. *Energy Conversion and Management*, 46(18-19), 2927–2942. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.01.015>.
17. Ackermann, T., Andersson, G., & Söder, L. (2001). Distributed generation: A definition. *Electric Power Systems Research*, 57(3), 195–204. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(01\)00101-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(01)00101-8).

REFERENCES

1. International Energy Agency (IEA). (2022). *World Energy Outlook 2022*. Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.
2. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). *Renewable Capacity Statistics 2023*. Abu Dhabi: IRENA. <https://www.irena.org/Statistics>.
3. Moreno, R., Moreira, R., & Rudnick, H. (2020). Integration of renewable energy sources into the electrical grid: Technical and economic challenges. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(1), 27–36. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2926520>.
4. Chen, H., Gooi, H. B., & Wang, M. Q. (2015). Sizing of energy storage for microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1), 238–248. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2411434>.
5. Liserre, M., Sauter, T., & Hung, J. Y. (2011). Future energy systems: Integrating renewable energy sources into the smart power grid through industrial electronics. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 4(1), 18–37. <https://doi.org/10.1109/MIE.2010.935861>.
6. E. Ela, V. Diakov, E. Ibanez, and M. Heaney, “Impacts of Variability and Uncertainty in Solar Photovoltaic Generation at Multiple Timescales”, *National Renewable Energy Laboratory* pp.9-10. May 2023.
7. Zhang, Y., Li, G., & Wang, L. (2017). Optimization of reactive power and energy loss in smart grid environments. *Energy Procedia*, 141, 413–418. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.105>.
8. Pérez, C., Reinoso, M., & Lobato, E. (2019). Reactive power compensation techniques and applications in power distribution networks: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 423–435. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.005>.
9. Hatziargyriou, N. D., Asano, H., Irvani, R., & Marnay, C. (2007). Microgrids: An overview of ongoing research, development, and demonstration projects. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(4), 78–94. <https://doi.org/10.1109/MPAE.2007.376583>.
10. Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., de Vicuña, L. G., & Castilla, M. (2011). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158–172. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534>.
11. Karanki, S. B., Geddada, N., Mishra, M. K., & Kumar, B. K. (2014). A modified three-phase four-wire UPQC topology with reduced DC-link voltage rating. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(9), 3555–3566. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2216231>
12. Abarzadeh, M., & Ranjbar, A. M. (2014). Optimal reactive power planning in distribution networks with distributed generators using a multi-objective approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 63, 475–482. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.005>.
14. Hung, D. Q., Mithulananthan, N., & Bansal, R. C. (2014). Analytical expressions for DG allocation in primary distribution networks. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29(2), 507–516. <https://doi.org/10.1109/TEC.2014.2302331>
15. Civanlar, S., Grainger, J. J., Yin, H., & Lee, S. S. H. (1988). Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3), 1217–1223. <https://doi.org/10.1109/61.193906>.
16. Bansal, R. C. (2005). Automatic reactive power control of autonomous hybrid power systems. *Energy Conversion and Management*, 46(18-19), 2927–2942. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.01.015>.
17. Ackermann, T., Andersson, G., & Söder, L. (2001). Distributed generation: A definition. *Electric Power Systems Research*, 57(3), 195–204. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(01\)00101-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(01)00101-8).