



Taqsimlangan generatsiyaning taqsimlovchi tarmoqlarda rele himoyasi ishiga ta'sirini tahlil qilish

Olga V. Radionova¹, Dilafruz X. Salixova^{1,a}

¹ PhD, dots., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; tstu_energy@mail.ru <https://orcid.org/0009-0009-3909-4888>

^{1,a} assistant, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; d.salixova@tdtu.uz <https://orcid.org/0009-0001-3185-8478>

Dolzarbli: zamonaviy jahon energetikasi markazlashgan generatsiya tizimlaridan qayta tiklanuvchi energiya manbalarining (QTEM) ulushi yuqori bo'lgan taqsimlangan generatsiya tizimlariga o'tish davrini boshdan kechirmoqda. Bu jarayon global ekologik kun tartibi hamda Parij kelishuvi doirasida issiqxona gazlari chiqindilarini kamaytirish zaruratiga asoslanadi [1]. So'nggi yillarda O'zbekiston Respublikasi energetika sektorini transformatsiya qilishda sezilarli yutuqlarga erishmoqda. IRENA 2026 statistik ma'lumotlariga ko'ra, mamlakatda QTEMning umumiy o'rnatilgan quvvati 2025-yil oxiriga kelib 10 027 MVtga yetdi, 2016-yilda bu ko'rsatkich atigi 1 883 MVtni tashkil etgan edi [2]. "O'zbekiston Respublikasining 2019–2030-yillar davrida "yashil" iqtisodiyotga o'tish strategiyasi" va undan keyingi hujjatlarda QTEM quvvatini 27 GVtga yetkazish va 2030-yilga kelib umumiy energiya balansida "toza" energiya ulushini 40 foizga oshirish asosiy maqsad etib belgilangan [3]. O'n yillik oxiriga kelib mamlakat aholisi 39 million kishiga yetishi, elektr energiyasiga bo'lgan ehtiyoj esa 120 TVt-soatgacha oshishi kutilmoqda [4]. Bu rejalarni amalga oshirish quyosh va shamol elektr stansiyalarini mavjud radial o'rta kuchlanishli (6–35 kV) tarmoqlarga ommaviy ulashni nazarda tutadi. Biroq «Hududiy elektr tarmoqlari» AJ balansida yuz ming kilometrdan ortiq liniyani tashkil etadigan bu tarmoqlar dastlab tizim podstansiyasidan iste'molchilarga bir yo'nalishli quvvat oqimi bilan passiv rejimda ishlash uchun loyihalashtirilgan. QTEM qurilmalarining ulanishi bunday tarmoqlarni bir nechta ta'minot manbalariga ega faol tizimlarga aylantiradi, bu esa rele himoyasi va avtomatikasi (RHA) tizimlari faoliyatining asosiy tamoyillarini buzadi. Shuning uchun, taqsimlangan generatsiyaga ega tarmoqlarda himoyani o'rnatish uchun samarali algoritmlarni yaratish maqsadida qayta tiklanadigan energiya manbalarining rele himoyasining ishlashiga ta'sirini tahlil qilish muhimdir.

Maqsad: ushbu ishning maqsadi quvvat oqimi yo'nalishi o'zgarganda QTEM asosidagi elektr stansiyalarining qisqa tutashuv (QT) toklari parametrlariga va taqsimlash tarmoqlarida rele himoyasi ishlashiga ta'sirini tahlil qilishdan iborat.

Usullari: DigSILENT PowerFactory dasturiy kompleksida modellash va QT toklarini hisoblash hamda maksimal tok himoyasi (MTH) ustavkalarini aniqlash.

Natijalar: qiyosiy tahlil o'tkazildi va taqsimlangan generatsiyaning taqsimlash tarmoqlarida rele himoyasi ishlashiga sezilarli ta'siri aniqlandi, bu himoyalarni moslashuvchan sozlash algoritmlarini ishlab chiqishni talab etadi.

Kalit so'zlar: qayta tiklanuvchi energiya manbalari (QTEM); taqsimlash tarmoqlari; rele himoyasi va avtomatikasi (RHA); maksimal tok himoyasi (MTH); qisqa tutashuv toklari (QT toklari); selektivlik; sezgirlik; noto'g'ri ishlash.

Анализ влияния распределенной генерации на работу релейной защиты в распределительных сетях

Ольга В. Радионов¹, Дилафруз Х. Салихова^{1,a}

¹ PhD, доц., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; tstu_energy@mail.ru <https://orcid.org/0009-0009-3909-4888>

^{1,a} асс., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; d.salixova@tdtu.uz <https://orcid.org/0009-0001-3185-8478>

Актуальность: современная мировая энергетика находится в периоде трансформации, характеризующимся переходом от централизованных систем генерации к распределенным с высокой долей возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Этот процесс реализуется на основе глобальной экологической повестки с необходимостью сокращения выбросов парниковых газов в рамках Парижского соглашения [1]. В последние годы Республика Узбекистан демонстрирует значительный прогресс в трансформации энергетического сектора. Согласно статистическим данным IRENA 2026, суммарная установленная мощность возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в стране к концу 2025 года достигла 10 027 МВт. Для сравнения, в 2016 году этот показатель составлял всего 1 883 МВт. [2]. В «Стратегии перехода Республики Узбекистан на «зеленую» экономику на период 2019–2030 годов» и далее поставлена главная цель – увеличить мощность ВИЭ до 27 ГВт и долю «чистой» энергии в общем балансе до 40% к 2030 году [3]. Ожидается, что к концу десятилетия население страны вырастет до 39 млн. человек, потребность в электроэнергии увеличится до 120 ТВт·ч/год [4]. Реализация этих планов предполагает массовое подключение солнечных и ветровых электростанций к существующим радиальным сетям среднего напряжения (6–35 кВ). Однако конструкция этих сетей, на долю которых в активах АО «Региональные электрические сети» приходится более сотни тысяч километров линий, изначально проектировалась для режима работы с односторонним потоком мощности от системной подстанции к потребителям. Подключение установок ВИЭ превращает такие сети в активные системы с множественными источниками питания, что нарушает базовые принципы функционирования систем их релейной защиты и автоматики (РЗА). Поэтому актуален анализ влияния ВИЭ на функционирование ре-

For citation: Radionova O.V., Salixova D.X. Analysis of the Impact of Distributed Generation on Relay Protection Operation in Distribution Networks. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3 (1), pp. 135-142.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23471621>

Received: 15.04.2026
Revised: 05.05.2026
Accepted: 16.06.2026
Published: 19.10.2026

Copyright: © Olga V. Radionova, Dilafruz Kh. Salikhova, 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/>).

лейной защиты для создания эффективных алгоритмов настройки защит в сетях с распределённой генерацией.

Цель: анализ влияния электростанций на ВИЭ на параметры токов короткого замыкания (КЗ) и функционирование релейной защиты в распределительных сетях при изменении направления векторов мощности.

Методы: моделирование и расчет токов КЗ в программном комплексе PowerFactory DIgSILENT и определение уставок максимальной токовой защиты.

Результаты: проведен сравнительный анализ и выявлено существенное влияние распределенной генерации на работу релейной защиты в распределительных сетях, что требует разработки алгоритмов адаптивной настройки защит.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии (ВИЭ), распределительные сети, релейная защита и автоматика (РЗА), максимальная токовая защита (МТЗ), токи короткого замыкания (ТКЗ), селективность, чувствительность, ложное срабатывание.

Analysis of the Impact of Distributed Generation on Relay Protection Operation in Distribution Networks

Olga V. Radionova¹, Dilafruz Kh. Salikhova^{1,a}

¹ PhD, assoc. prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; tstu_energy@mail.ru <https://orcid.org/0009-0009-3909-4888>

^{1,a} assistant, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; d.salixova@tdtu.uz <https://orcid.org/0009-0001-3185-8478>

Relevance: the modern global power industry is undergoing a transformation from centralized generation systems to distributed ones with a high share of renewable energy sources (RES). This process is driven by the global environmental agenda and the need to reduce greenhouse gas emissions under the Paris Agreement [1]. In recent years, the Republic of Uzbekistan has made significant progress in transforming its energy sector. According to IRENA statistics (2026), the country's total installed RES capacity reached 10,027 MW by the end of 2025, compared with only 1,883 MW in 2016 [2]. The Strategy for the Transition of the Republic of Uzbekistan to a "Green" Economy for 2019–2030 and subsequent documents set the principal goal of increasing RES capacity to 27 GW and raising the share of "clean" energy in the overall energy balance to 40% by 2030 [3]. By the end of the decade, the population is expected to grow to 39 million and electricity demand to reach 120 TWh [4]. Implementing these plans entails the large-scale connection of solar and wind power plants to existing radial medium-voltage networks (6–35 kV). However, these networks, which account for more than one hundred thousand kilometers of lines in the assets of JSC "Regional Electric Networks," were originally designed for passive operation with a unidirectional power flow from the system substation to consumers. The connection of RES installations turns such networks into active systems with multiple supply sources, which violates the basic operating principles of relay protection and automation (RPA) systems. Therefore, it is relevant to analyze the impact of renewable energy sources (RES) on the operation of relay protection, with the aim of developing effective algorithms for setting protection systems in networks with distributed generation.

Aim: is to analyze the impact of RES-based power plants on short-circuit (SC) current parameters and on the operation of relay protection in distribution networks under changes in the direction of power flow.

Methods: modeling and calculation of SC currents in DIgSILENT PowerFactory, and determination of overcurrent protection (OCP) settings.

Results: a comparative analysis was performed, revealing a substantial influence of distributed generation on the operation of relay protection in distribution networks, which calls for the development of adaptive protection-setting algorithms.

Keywords: renewable energy sources (RES); distribution networks; relay protection and automation (RPA); overcurrent protection (OCP); short-circuit currents (SCC); selectivity; sensitivity; false tripping.

1. Введение (Introduction)

Распределительные электрические сети традиционно строились как радиальные системы, где генерация и режимы работы оборудования определялись иерархией от источника питания (ПС 6–35 кВ) к конечным потребителям (рис.1).

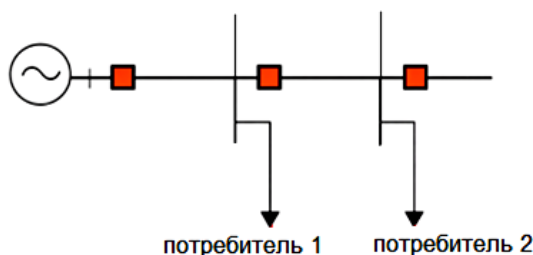


Рис. 1. Радиальная распределительная сеть

Fig. 1. Radial Distribution Network

Состав РЗА распределительных сетей и условия их эксплуатации регламентируется правилами [5,6]. Комплекс РЗ и А должен удовлетворять традиционным требованиям к релейной защите: селективность, быстродействие, чувствительность, надежность. Защита должна реагировать на все виды междуфазных (трех- и двухфазных) КЗ с действием на отключение поврежденного элемента сети. В распределительных сетях с изолированной или компенсированной нейтралью токи при однофазных замыканиях малы, поэтому такие повреждения обычно не опасны для оборудования. Сеть может продолжать работу, а релейная защита ограничивается подачей сигнала персоналу.

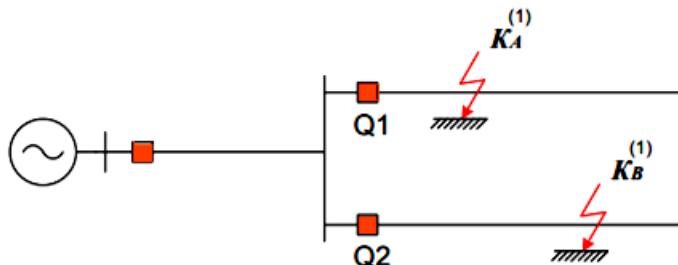


Рис. 2. Двойное короткое замыкание

Fig. 2. Double Short-Circuit

В режиме длительной работы сети, имеющей замыкание на землю одной из фаз в одной точке, до его устранения возможно замыкание на землю другой фазы во второй точке на том же или ином присоединении – двойное замыкание на землю (рис.2). При наличии двух точек, связанных с землей, образуется контур короткого замыкания, включающий две поврежденные фазы и участок земли между точками повреждения. Сопротивление контура незначительно, а проходящие при этом токи соизмеримы с токами двухфазного КЗ, в связи с чем требуется действие защиты на отключение аналогично двухфазному КЗ. Особенностью действия защиты при двойных замыканиях на землю является возможность и даже целесообразность отключения только одного присоединения с поврежденной фазой, например Q1. При этом, двойное замыкание перейдет в однофазное, а второе присоединение может остаться в работе. Такое действие возможно, если однофазные повреждения произошли на разных присоединениях. Для защиты воздушных и кабельных линий от КЗ с большими токами повреждения – трехфазных, двухфазных и двойных используются многоступенчатые токовые защиты, обеспечивающие необходимые чувствительность и быстродействие. При возникновении проблем с обеспечением чувствительности или (и) быстродействия могут использоваться дистанционные защиты. В статье дистанционные защиты не рассматриваются, т.к. практически не применяются для защиты распределительных сетей. Последние ступени установленных на линиях защит должны согласовываться между собой по времени, что приводит к увеличению выдержки времени защит по мере приближения к источникам питания.

Внедрение распределенной генерации на основе ВИЭ полностью меняет физическую природу процессов в распределительной сети. Подключение фотоэлектрических (ФЭС), ветровых (ВЭС) и малых гидроэлектростанций (МГЭС) превращает пассивную сеть в активную систему с различными источниками. В результате мощности и токи повреждения могут протекать в различных направлениях, что делает традиционные методы выбора уставок максимальной токовой защиты (МТЗ) неэффективными. Научные исследования последних лет фокусируются на выявлении специфических рисков, связанных с различными типами генерации:

1. **Солнечные станции (фотоэлектрические установки):** обладают высокой суточной вариативностью и подключаются через инверторные преобразователи. ТКЗ от таких источников жестко ограничены алгоритмами управления инвертора, что создает проблемы для чувствительности защит.

2. **Ветровые установки:** создают непредсказуемые колебания мощности. Современные ВЭС также используют инверторы, чей вклад в ТКЗ отличается от традиционной генерации.

3. **Малая гидроэнергетика:** обычно использует синхронные генераторы, которые обладают значительной электромагнитной инерцией и способны выдавать ТКЗ, в несколько раз превышающие номинальные, что ведет к росту уровней ТКЗ и возможной потере селективности.

2. Методы и материалы (Methods and materials)

В исследовании применялся метод моделирования, реализованный в программной среде Power Factory DIgSILENT 2022 на основе стандартной модели IEC TR 60909-4-2 (рис.3). Объектом данного исследования является система релейной защиты и автоматики (РЗА) блока «линия — трансформатор» в распределительных сетях среднего напряжения. Традиционно

такие блоки защищаются ненаправленными токовыми защитами, исходя из радиальной структуры сети. Однако интеграция распределенной генерации и мощной двигательной нагрузки превращает защищаемый блок в систему с многосторонним питанием, что требует пересмотра подходов к обеспечению селективности и чувствительности.

Техническое описание расчетной модели.

Исследуемая схема (рис.3) представляет собой типичный фрагмент распределительной сети. Структура модели включает:

- Внешняя энергосистема: моделируется как источник напряжения с мощностью трехфазного КЗ на шинах высшего напряжения ($S_k = 750 \text{ MVA}$).
- Двойной блок «линия — трансформатор»: две параллельные кабельные линии длиной 4,85 км каждая, подключенные к трансформаторам мощностью $S_n = 15 \text{ MVA}$ (33/6,3 кВ).
- Нагрузочный узел: шины 6,3 кВ (узел F), питающие две нагрузки мощностью $S_n = 3,85 \text{ MVA}$ каждая.

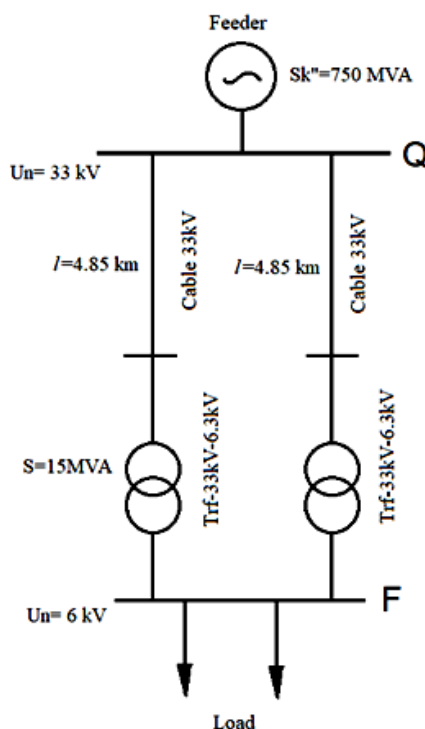


Рис. 3. Исследуемая схема IEC TR 60909-4-2

Fig. 3. Investigated scheme IEC TR 60909-4-2

При расчёте уставок релейной защиты в первую очередь определяются пороговые значения срабатывания пусковых и измерительных органов, а также временные выдержки, обеспечивающие селективность и надёжность работы защиты. Эти параметры задаются на основе анализа токов короткого замыкания, характеристик оборудования и требований стандартов [7,8].

Расчёт токов короткого замыкания выполнен в программной среде PowerFactory Dlg-SILENT, которая обеспечивает автоматизированное приведение параметров сети и наглядное представление результатов моделирования.

3. Результаты и обсуждение (Results and discussion)

В данной работе рассматривается влияние распределенной генерации на ТКЗ и эффективность функционирования традиционных устройств РЗА. Исследование разделено на два сценария для последовательной оценки вклада каждого элемента сети.

Случай 1. В качестве базового сценария рассматривается классический режим работы радиальной распределительной сети в отсутствие распределенной генерации. Целью данного этапа является определение исходных уровней ТКЗ и оценка эффективности традиционных алгоритмов релейной защиты.

Расчет параметров выполнен для характерных узлов схемы (F, Q). Результаты вычислений начальных периодических ТКЗ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчет токов КЗ в 1 случае.**Table 1.** Short-circuit current calculation in Case 1.

Узел	Uном, кВ	$I_{k(3)}$, кА	$I_{k(3) \min}$, кА	$I_{k(2)}$, кА
F	6,00	14,78	13,7	12,56
E	33,00	9,65	9,21	8,2
Q	33,00	13,12	13,12	11,15

Защищаемым объектом является блок «линия-трансформатор».

В качестве защиты объектов сети 6 ÷ 33 кВ от междуфазных КЗ в основном используются токовые защиты, контролирующие фазные токи. Часто токовые защиты традиционного исполнения выполнены одноступенчатыми с током срабатывания, отстроенным от нагрузочных режимов: максимальная токовая защита (МТЗ). Иногда МТЗ (III ступень) дополняется отсечкой без выдержки времени (I ступень) и редко отсечкой с выдержкой времени (II ступень).

Расчет каждой ступени токовой защиты включает: определение тока срабатывания, времени срабатывания и коэффициента чувствительности [9]. Первичный ток срабатывания n -ой ступени выбирается из условия отстройки от расчетного тока:

$$I_{сз}^n = K_{отс}^n \cdot I_{рз}^n ; \quad (1)$$

где $K_{отс}^n$ – коэффициент отстройки; $I_{рз}^n$ – максимальный ток, протекающий через защиту в расчетном режиме работы сети.

В терминале защиты задается ток срабатывания реле тока. Термин «реле тока» следует понимать условно, т.к. в терминале собственно реле отсутствует, а его функции выполняет соответствующий фрагмент программного обеспечения. Вторичный ток срабатывания ступени – ток срабатывания реле тока определяется по выражению:

$$I_{с.р.} = \frac{K_{сх} I_{с.з.}}{K_I} ; \quad (2)$$

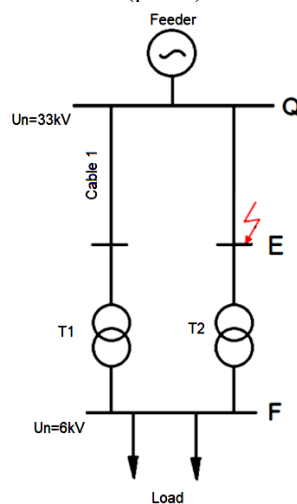
где K_I – коэффициент трансформации трансформаторов тока; $K_{сх}$ – коэффициент схемы, учитывающий схему соединений трансформаторов тока: для схемы «звезда» и – для схемы «треугольник».

Эффективность защиты оценивается по коэффициенту чувствительности:

$$K_{ч} = \frac{I_{кз(2)}}{I_{с.р.}} ; \quad (3)$$

где $I_{кз(2)}$ – вторичный минимальный ток двухфазного КЗ в расчетной точке; $I_{с.р.}$ – ток срабатывания реле.

Расчет отсечки ТО1. Для обеспечения быстродействующего отключения повреждений в начале защищаемой линии (узел Q) выполнена настройка токовой отсечки. Выполняем расчет, отстраиваясь от тока трехфазного КЗ в точке E (рис.4).

**Рис. 4.** Исследуемая схема: случай 1**Fig. 4.** Investigated scheme: Case 1

Режим сети, обеспечивающий максимальный ток в защите: линия (Cable 1) отключена, сопротивление системы минимально. Ток КЗ в линии $I_{k(3)} = 9,65 \text{ кА}$:

$$I_{T0}^I \geq 1,2 \cdot 9650 = 11,58 \text{ кА}.$$

Отстройка от суммарного броска тока намагничивания трансформаторов T1 и T2, проходящего через защиту при восстановлении питания от системы в режиме отключенной линии (Cable 1). Номинальные токи трансформаторов, соответствующие их мощности:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} U_{ном}} = \frac{15000}{1,73 \cdot 33} = 262,7 \text{ А} ;$$

$$I_{T0}^I \geq 2,5 \cdot 2 \cdot 262,7 = 1313,5 \text{ A.}$$

Выбираем $I_{T0}^I = 11,58 \text{ кА}$.

Расчёт МТЗ. В качестве ближнего резервирования защит силовых трансформаторов Т1 и Т2 (33/6,3 кВ) спроектирована максимальная токовая защита на стороне высшего напряжения (33 кВ). Расчет тока срабатывания МТЗ выполнен по условию надежной отстройки от тока нагрузки в ремонтном режиме (при отключении одного из параллельных элементов и переводе всей нагрузки на оставшийся трансформатор):

$$I_{с.з.}^{MTЗ} \geq \frac{K_{отс} \cdot I_{раб.маx}}{K_B}, \quad (4)$$

$K_{отс} = 1,2$ – коэффициент отстройки для цифровых терминалов;

$K_B = 0,95$ – коэффициент возврата измерительного органа тока.

$$I_{раб.маx} = \frac{S}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{30000}{1,73 \cdot 33} = 524,87 \text{ A};$$

$$I_{с.з.}^{MTЗ} \geq \frac{1,2 \cdot 524,87}{0,95} = 663,0 \text{ A}.$$

Проверка чувствительности определяется соотношением $I_{k(2)}$ к коэффициенту трансформации ($n=33/6=5,5$) и $I_{с.з.}^{MTЗ}$:

$$K_{\chi} = \frac{I_{kF(2)}}{n \cdot I_{с.з.}^{MTЗ}} = \frac{12,56}{5,5 \cdot 663,0} = 3,4 > 1,5.$$

Требование по чувствительности выполняется.

Случай 2. Подключение солнечной фотоэлектрической станции (ФЭС).

Во втором сценарии для исследования влияния распределенной генерации на параметры и чувствительность релейной защиты (МТЗ и ТО) в программном комплексе *DigSILENT PowerFactory* реализована составная динамическая модель (Composite Model) солнечной электростанции мощность 25 MVA на шинах низшего напряжения 6,3 кВ (узел F). При моделировании принята промышленная модель инвертора **WECC PVD1 (Distributed Small PV Plants)**.

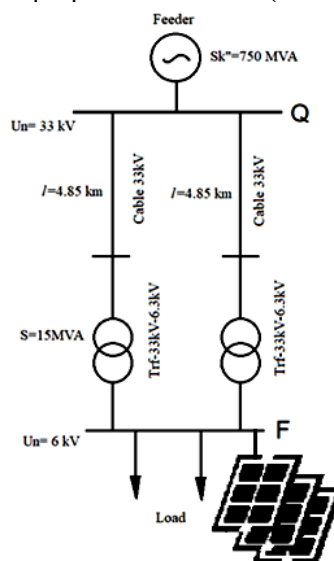


Рис. 5. Исследуемая схема: случай 2

Fig. 5. Investigated scheme: Case 2

Структура (фрейм) взаимодействия математических блоков модели и физических элементов сети представлена ниже.

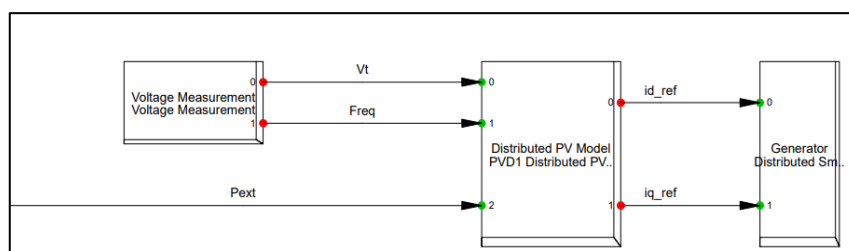


Рис. 6. Фрейм WECC распределённых малых фотоэлектрических станций

Fig. 6. WECC Model frame for distributed small Photovoltaic plants

**Таблица 2.** Расчет токов КЗ во втором случае.**Table 2.** Short-circuit current calculation in Case 2.

Узел	Uном, кВ	Ik", кА	Ik(3) min, кА	Ik(2), кА
F	6,00	17,95	13,71	15,26
E	33,00	9,62	9,01	8,20
Q	33,00	13,67	13,12	11,62

Расчет МТЗ. Рабочий максимальный ток в этом случае составляет 1,62 кА при работе одного трансформатора.:

$$I_{\text{с.з.}}^{\text{МТЗ}} \geq \frac{K_{\text{отс}} \cdot I_{\text{раб.мах}}}{K_{\text{в}}};$$

$$I_{\text{с.з.}}^{\text{МТЗ}} \geq \frac{1,2 \cdot 1620}{0,95} = 2,046 \text{ А.}$$

Проверка чувствительности защиты:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{kF}(2)}}{n \cdot I_{\text{с.з.}}^{\text{МТЗ}}} = \frac{15,26}{5,5 \cdot 2,046} = 1,35 < 1,5.$$

Защита не проходит по чувствительности. Это означает, что при возникновении КЗ во внешних узлах (например, на вышестоящих шинах 35 кВ или соседних фидерах), активные источники в узле F начинают генерировать ток подпитки, направленный навстречу основному току системы. Таким образом, через измерительные трансформаторы защиты начинает протекать ток обратного направления. Появление встречных токов подпитки от СЭС делает обязательным использование органов определения направления тока к.з. в составе МТЗ для предотвращения неселективных отключений фидеров при повреждениях на смежных участках.

4. Заключение (Conclusion)

В данной работе проведён сравнительный анализ функционирования традиционных ненаправленных токовых защит (МТЗ и ТО) блока «линия — трансформатор» в распределительных сетях среднего напряжения при подключении к ним распределённой генерации. Моделирование переходных процессов и расчёты токов короткого замыкания (КЗ) выполнены в программном комплексе DiGSiLENT PowerFactory 2022 с использованием моделей стандартов IEC TR 60909-4-2 и WECC PVD1.

Анализ полученных результатов моделирования двух расчётных сценариев позволяет сделать следующие ключевые выводы:

1. Базовый радиальный режим (Случай 1): Классические алгоритмы ступенчатых токовых защит, отстроенные от параметров пассивной радиальной сети, обеспечивают требуемые показатели селективности, чувствительности и быстродействия.

2. Влияние фотоэлектрических станций (Случай 2): Подключение солнечной генерации (СЭС) на шины 6,3 кВ кардинально меняет режимы сети, превращая её в систему с двухсторонним питанием и изменяющимся, переменным направлением векторов мощности. Алгоритмы ограничения ТКЗ, заложенные в инверторах WECC PVD1, снижают коэффициент чувствительности МТЗ до 1,35, что не обеспечивает надёжное срабатывание терминала.

Следовательно, разработка научно-обоснованной методологии анализа влияния ВИЭ на функционирование релейной защиты и создание алгоритмов адаптивной настройки защит в сетях с распределённой генерацией являются приоритетными задачами для обеспечения устойчивого развития электроэнергетики Узбекистана.

ЛИТЕРАТУРА

1. United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). Paris agreement [PDF]. https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian.pdf.
2. International Renewable Energy Agency. (2026). Renewable capacity statistics 2026 [PDF]. International Renewable Energy Agency. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2026/Mar/IRENA_DAT_RE_capacity_statistics_2026.pdf.
3. President of the Republic of Uzbekistan. (2019, October 4). On approval of the strategy for transition of the Republic of Uzbekistan to a “green” economy for 2019–2030 (Decree No. PP-4477). <https://lex.uz/docs/4539506>.
4. Agency for Strategic Development and Reforms under the President of the Republic of Uzbekistan. (2025, December 30). Стратегия «Узбекистан – 2030» подготовлена в новой редакции. <https://asdr.gov.uz/ru/strategiya-uzbekistan-2030-podgotovlena-v-novoj-redakczii/>.
5. Правила устройства электроустановок (7-е изд.) – М.: Энергоатомиздат. (2025).
6. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. (2014) – 15-е изд. – М.: Энергоатомиздат.

7. International Electrotechnical Commission. (2022). Measuring relays and protection equipment - Part 1: Common requirements (IEC Standard No. 60255-1). <https://webstore.iec.ch/>.
8. Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2021). IEEE guide for protective relay applications to distribution lines (IEEE Standard No. C37.230-2020). IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/>.
9. Барабанов, Ю. А. (2013). Vybór ustavok srabatyvaniya mikroprotssessornykh terminalov releynoy zashchity i avtomatiki serii "Sirius" dlya raspredelitelnykh setey 6-35 kV [Выбор настроек работы для защиты микропроцессорных реле и автоматических терминалов серии "Sirius" для распределительных сетей 6-35 кВ]. ЗАО «РАДИУС Автоматика».
10. Аллаев К.Р. Современная энергетика и перспективы её развития /под ред. Салимова А.У. – Т.: Fan va texnologiyalar nashriyot-manbaa uyi, 2021. – 952 с.
11. Ситдилов Р.А., Радионова О.В., Талипова С.Б. Повышение эффективности релейной защиты и автоматики при цифровизации электроэнергетики. //Сборник научных статей Международной научной конференции «INNOVATION-2025». – Ташкент, 2025. – С. 171-174.
12. Ширинов А.Б., Радионова О.В. Анализ алгоритмов цифровой обработки сигналов в устройствах релейной защиты энергосистем. //Сборник материалов республиканской научно-технической конференции «Будущее энергетики Узбекистана: возобновляемые источники энергии и интеллектуальные технологии», 1 часть. – Термиз: ТГИАУ, 2026. – С. 546–548.

REFERENCES

1. United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). Paris agreement [PDF]. https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf.
2. International Renewable Energy Agency. (2026). Renewable capacity statistics 2026 [PDF]. International Renewable Energy Agency. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2026/Mar/IRENA_DAT_RE_capacity_statistics_2026.pdf.
3. President of the Republic of Uzbekistan. (2019, October 4). On approval of the strategy for transition of the Republic of Uzbekistan to a "green" economy for 2019–2030 (Decree No. PP-4477). <https://lex.uz/docs/4539506>.
4. Agency for Strategic Development and Reforms under the President of the Republic of Uzbekistan. (2025, December 30). Strategy "Uzbekistan – 2030" prepared in a new edition. <https://asdr.gov.uz/ru/strategiya-uzbekistan-2030-podgotovlena-v-novoj-redakczii/>.
5. Energoatomizdat. (2025). Rules for electrical installations (7th ed.). Moscow: Energoatomizdat.
6. Energoatomizdat. (2014). Rules for technical operation of power plants and networks (15th ed.). Moscow: Energoatomizdat.
7. International Electrotechnical Commission. (2022). Measuring relays and protection equipment – Part 1: Common requirements (IEC Standard No. 60255-1). <https://webstore.iec.ch/>.
8. Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2021). IEEE guide for protective relay applications to distribution lines (IEEE Standard No. C37.230-2020). IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/>.
9. Barabanov, Yu. A. (2013). Selection of operating settings for microprocessor relay protection and automation terminals of the "Sirius" series for distribution networks 6–35 kV. ЗАО "Radius Automatics."
10. Allaev, K. R. (2021). Modern energy and prospects for its development (A. U. Salimov, Ed.). Tashkent: Fan va texnologiyalar nashriyot-manbaa uyi.
11. Sitdikov, R.A., Radionova, O.V., Talipova, S.B. (2025). Improving the efficiency of relay protection and automation in the digitalization of the electric power industry. Proceedings of the International Scientific Conference "INNOVATION-2025" (pp. 171–174). Tashkent.
12. Shirinov, A. B., & Radionova, O. V. (2026). Analysis of digital signal processing algorithms in relay protection devices of power systems. Proceedings of the Republican Scientific and Technical Conference "The Future of Energy in Uzbekistan: Renewable Energy Sources and Intelligent Technologies," Part 1 (pp. 546–548). Termez: TGI AU.