

УДК: 621.311.243:621.311.1

<https://doi.org/10.70769/2181-4732.ITJ.2026-m.08>

ИНТЕГРАЦИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЭНЕРГОСИСТЕМЫ: ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ ВЫЗОВОВ И РЕШЕНИЙ

Худайназаров Анвар Панжи угли¹- стажер-исследователь, E-mail: anvarx-89@mail.com, ORCID (0009-0004-2646-3625), Science ID (MTN-0325-0012);

Ишанов Жалолиддин Хамидуллаевич²- стажер-исследователь, E-mail: ishanovjaloliddin@gmail.com, ORCID (0009-0009-3230-5128), Science ID (MSN-1225-0071);

Жураев Эркин Туробович²- доктор философии по техническим наукам (PhD). e-mail: ejuraev@gmail.com, ORCID (0009-0003-3190-6262), Science ID (FBX-0525-0080).

¹Институт материаловедения Академии наук Республики Узбекистан, Ташкентская обл., Узбекистан

²Национальный научно-исследовательский институт возобновляемых источников энергии при Министерстве энергетики Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан

Аннотация. Интеграция фотогальванических систем (ФЭС) в современные электрические сети является критическим элементом глобального энергетического перехода. Однако этот процесс сопровождается значительными техническими вызовами, включая снижение инерции системы, нестабильность напряжения и частоты, гармонические искажения, проблемы релейной защиты и операционной гибкости.

В данной обзорной статье проведён систематический анализ ключевых технических проблем, возникающих при интеграции ФЭС как на уровне маломасштабных распределённых систем, так и на уровне крупномасштабных централизованных солнечных электростанций. Рассмотрены фундаментальные характеристики солнечной генерации, включая частичную непредсказуемость и неконтролируемую изменчивость, которые обуславливают стохастический характер выработки электроэнергии. Проанализированы проблемы регулирования напряжения и качества электроэнергии в распределительных сетях, а также вопросы стабильности напряжения, угловой стабильности ротора и стабильности частоты в передающих сетях.

Представлен сравнительный анализ стратегий управления инверторами, включая традиционные методы (ПИ/ПИД-регуляторы, управление скользящим режимом, модельно-прогнозное управление) и интеллектуальные подходы на основе нечёткой логики, нейронных сетей и обучения с подкреплением. Показано, что комбинированное применение традиционных и интеллектуальных методов повышает КПД на 5–10%, а интеллектуальные методы снижают ошибки отслеживания максимальной мощности на 20%. Рассмотрена роль аккумуляторных систем накопления энергии в обеспечении синтетической инерции и вспомогательных услуг. Особое внимание уделяется перспективам развития, включая гибридные стратегии, объяснимый искусственный интеллект и децентрализованные сети с использованием блокчейна, для обеспечения надёжной эксплуатации умных сетей будущего.

Ключевые слова: фотогальванические системы, интеграция в энергосистему, устойчивость частоты, качество электроэнергии, системы накопления энергии, искусственный интеллект, виртуальная инерция.

UO‘K: 621.311.243:621.311.1

FOTOELEKTR TIZIMLARNI ENERGETIKA TIZIMLARIGA INTEGRATSIYALASH: TEXNIK MUAMMOLAR VA YECHIMLAR SHARHI

Xudaynazarov Anvar Panji o‘g‘li¹- stajyor-tadqiqotchi;

Ishanov Jaloliddin Hamidullaevich²- stajyor-tadqiqotchi;

Juraev Erkin Turobovich²- texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD).

¹O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Materialshunoslik instituti,
Toshkent viloyati, O'zbekiston

²O'zbekiston Respublikasi Energetika vazirligi huzuridagi Qayta tiklanuvchi energiya manbalari
milliy ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent sh., O'zbekiston

Annotatsiya. Fotoelektr tizimlarni (FET) zamonaviy elektr tarmoqlariga integratsiyalash global energetik o'tishning muhim tarkibiy qismi hisoblanadi. Biroq ushbu jarayon qator texnik muammolar bilan bog'liq bo'lib, ular qatoriga tizim inertsia darajasining pasayishi, kuchlanish va chastota barqarorligining buzilishi, garmonik buzilishlar, rele himoyasi muammolari hamda operatsion moslashuvchanlik masalalari kiradi.

Ushbu maqolada FET integratsiyalashda yuzaga keladigan asosiy texnik muammolarning tizimli tahlili o'tkazilgan bo'lib, ham kichik ko'lamli taqsimlangan tizimlar, ham yirik ko'lamli markazlashgan quyosh elektr stansiyalari darajasida ko'rib chiqilgan. Quyosh generatsiyasining fundamental xususiyatlari, jumladan qisman bashorat qilib bo'lmaslik va boshqarib bo'lmaydigan o'zgaruvchanlik tahlil etilgan bo'lib, ular elektr energiyasi ishlab chiqarishning stoxastik xarakterini belgilaydi. Taqsimot tarmoqlarida kuchlanishni tartibga solish va elektr energiyasi sifati muammolari, shuningdek uzatish tarmoqlarida kuchlanish barqarorligi, rotorning burchak barqarorligi va chastota barqarorligi masalalari tahlil qilingan.

Invertorlarni boshqarish strategiyalarining qiyosiy tahlili keltirilgan bo'lib, an'anaviy usullar (PI/PID-regulyatorlar, sirpanish rejimida boshqarish, model-prognozli boshqarish) hamda loyqa mantiq, neyron tarmoqlar va mustahkamlash orqali o'rganishga asoslangan intellektual yondashuvlar o'z ichiga olgan. An'anaviy va intellektual usullarning birgalikda qo'llanilishi FIK ni 5–10% ga oshirishi, intellektual usullar esa maksimal quvvatni kuzatish xatolarini 20% ga kamaytirishini ko'rsatilgan. Akkumulyator energiya saqlash tizimlarining sintetik inertsia va yordamchi xizmatlarni ta'minlashdagi roli ko'rib chiqilgan. Kelajakdagi aqlli tarmoqlarning ishonchli ishlashini ta'minlash uchun gibrid strategiyalar, izohlanadigan sun'iy intellekt va blokcheyn asosidagi markazlashmagan tarmoqlar kabi rivojlanish istiqbollariga alohida e'tibor qaratilgan.

Kalit so'zlar: fotoelektr tizimlar, energotizimga integratsiya, chastota barqarorligi, elektr energiyasi sifati, energiya saqlash tizimlari, sun'iy intellekt, virtual inersiya.

UDC: 621.311.243:621.311.1

INTEGRATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS INTO POWER SYSTEMS: A REVIEW OF TECHNICAL CHALLENGES AND SOLUTIONS

Khudaynazarov, Anvar¹- Trainee researcher.

Ishanov, Jaloliddin²- Trainee researcher.

Juraev, Erkin²- Doctor of Philosophy in technical sciences (PhD).

¹Institute of Materials Science, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
Tashkent region, Uzbekistan

²National Research Institute of Renewable Energy Sources under the Ministry of Energy of the
Republic of Uzbekistan, Tashkent city, Uzbekistan

Abstract. The integration of photovoltaic systems (PVS) into modern power grids is a critical component of the global energy transition. However, this process is associated with significant technical challenges, including reduced system inertia, voltage and frequency instability, harmonic distortions, protection system issues, and operational flexibility constraints.

This review article presents a systematic analysis of the key technical problems arising from PVS integration at both the small-scale distributed system level and the large-scale centralized solar power plant level. The fundamental characteristics of solar generation are examined, including partial unpredictability and uncontrollable variability, which determine the stochastic nature of electricity production. Issues of voltage regulation and power quality in distribution networks are

analyzed, along with voltage stability, rotor angle stability, and frequency stability in transmission networks.

A comparative analysis of inverter control strategies is presented, encompassing traditional methods (PI/PID controllers, sliding mode control, model predictive control) and intelligent approaches based on fuzzy logic, neural networks, and reinforcement learning. It is demonstrated that the combined application of traditional and intelligent methods improves efficiency by 5–10%, while intelligent methods reduce maximum power point tracking errors by 20%. The role of battery energy storage systems in providing synthetic inertia and ancillary services is examined. Particular attention is given to future development prospects, including hybrid strategies, explainable artificial intelligence, and blockchain-based decentralized networks, to ensure the reliable operation of future smart grids.

Keywords: photovoltaic systems, power system integration, frequency stability, power quality, energy storage systems, artificial intelligence, virtual inertia.

Введение

Интеграция ФЭС носит двойственный характер. С одной стороны, это массовое внедрение маломасштабных распределенных систем (например, на крышах зданий) на уровне распределительных сетей [1]. С другой стороны, это строительство крупномасштабных централизованных солнечных электростанций, подключаемых к передающим сетям высокого напряжения [2]. Каждый из этих сценариев порождает свой набор специфических технических вызовов, включая проблемы с напряжением, частотой, гармониками и защитой [3].

Цель данного обзора - провести систематический анализ ключевых технических проблем, возникающих при интеграции ФЭС (стабильность, качество электроэнергии, релейная защита), и оценить современные стратегии управления и решения для их преодоления [4]. В обзоре рассматриваются как традиционные методы управления, так и передовые интеллектуальные подходы на основе искусственного интеллекта, направленные на обеспечение безопасной и эффективной интеграции солнечной генерации в современные энергосистемы [5]. Для полного понимания этих проблем необходимо в первую очередь рассмотреть фундаментальные характеристики солнечной энергии, которые лежат в их основе.



Рис. 1. Схематическая модель архитектуры гибридной микросети с интеграцией возобновляемых источников энергии, системами хранения и возможностью автономного (островного) функционирования [7].

Методы и материалы

1. Фундаментальные характеристики солнечной генерации и их влияние на энергосистему

Солнечная генерация энергии представляет собой ключевой элемент перехода к устойчивым источникам энергии, однако её интеграция в существующие энергосистемы сопряжена с рядом фундаментальных вызовов, обусловленных физической природой

фотоэлектрических (ФЭ) систем. В отличие от традиционной генерации на основе ископаемого топлива, где выходная мощность полностью контролируема и предсказуема благодаря регулируемому процессу сгорания топлива, солнечная энергия зависит от внешних факторов, таких как интенсивность солнечного излучения, погодные условия и географическое положение. Эти характеристики приводят к стохастическому характеру выработки, что требует переосмысления подходов к планированию, эксплуатации и управлению энергосистемами [6].

1.1 Частичная непредсказуемость

Частичная непредсказуемость солнечной генерации является одной из ключевых характеристик, ограничивающих её эффективную интеграцию в энергосистемы. Эта особенность проявляется в трудностях точного прогнозирования выработки энергии на горизонтах от нескольких часов до дней, обусловленных стохастической природой метеорологических факторов, таких как облачность, осадки и атмосферные возмущения [6]. В традиционных системах планирование обязательно по единицам основано на детерминированных моделях, где операторы заранее определяют состав работающего оборудования для покрытия прогнозируемого спроса. Однако при высокой доле солнечной энергии (например, свыше 30%) неопределенность приводит к необходимости стохастического подхода, что увеличивает требования к резервам мощности для компенсации ошибок прогноза [7].

Неопределенность солнечной выработки обусловлена несколькими факторами. Солнечное излучение варьируется в зависимости от времени суток, сезона и географического положения, но погодные аномалии добавляют случайный компонент. Исследования показывают, что ошибки в краткосрочных прогнозах могут достигать 20-30% в облачные дни, что приводит к перегрузкам или дефициту энергии в сети.

1.2 Неконтролируемая изменчивость

Неконтролируемая изменчивость солнечной генерации представляет собой значительную проблему для стабильности энергосистем, проявляясь в непостоянстве выходной мощности даже при точном прогнозировании среднего значения [6]. Эта характеристика обусловлена быстрыми колебаниями, вызванными, например, прохождением облаков, что приводит к резким изменениям выработки в масштабе секунд или минут [7]. В традиционных системах балансировка достигается за счет синхронных генераторов, обеспечивающих инерцию и регулирование частоты, но ФЭ системы, основанные на инверторах, не обладают этими свойствами, увеличивая потребность во вспомогательных услугах.

2. Проблемы интеграции маломасштабных ФЭ систем в распределительные сети

Интеграция маломасштабных фотоэлектрических (ФЭ) систем, таких как солнечные панели на крышах жилых домов, в распределительные сети представляет собой значительный вызов для современной энергетики. Исторически распределительные сети проектировались для однонаправленного потока мощности от подстанций к конечным потребителям, обеспечивая пассивный режим работы с предсказуемыми характеристиками нагрузки [8]. Однако массовое внедрение ФЭ систем трансформирует эти сети в активные, с двунаправленными потоками энергии, что приводит к фундаментальным изменениям в динамике системы. Инверторы ФЭ систем выступают в роли активных источников генерации, вводя переменные и неконтролируемые компоненты, для которых существующая инфраструктура не была адаптирована.

2.1 Регулирование напряжения

Регулирование напряжения в распределительных сетях с интегрированными маломасштабными ФЭ системами является критической задачей из-за изменчивого характера солнечной генерации. Колебания выработки, вызванные облачностью или суточными циклами, приводят к дисбалансу напряжения: в периоды высокой генерации и низкого потребления возникают обратные потоки, повышающие напряжение сверх допустимых лимитов (например, >1.05 п.у.), что угрожает оборудованию потребителей и сети [8].

Традиционные методы регулирования, такие как регуляторы ответвлений под нагрузкой (OLTC) на трансформаторах, недостаточно быстры для компенсации быстрых изменений ФЭ [9].

2.2 Качество электроэнергии и гармонические искажения

Качество электроэнергии в распределительных сетях с маломасштабными ФЭ системами существенно ухудшается из-за гармонических искажений, генерируемых инверторами. Эти устройства преобразуют постоянный ток от солнечных панелей в переменный, вводя нелинейности, которые искажают синусоидальную форму тока и напряжения [8].

Источники искажений включают коммутацию в инверторах, особенно в низкокачественных моделях без адекватных фильтров. При высокой плотности ФЭ гармоники суммируются, усиливая эффект в сети.

3. Проблемы интеграции крупномасштабных ФЭ систем в передающие сети

Локализованные технические проблемы крупномасштабных ФЭ станций связаны с их взаимодействием с передающими сетями, где инверторы выступают ключевыми элементами, и эти проблемы включают регулирование активной и реактивной мощности, необходимые для соответствия сетевым кодексам и поддержания стабильности [10], а также учитывают влияние на общую устойчивость системы, поскольку высокая проникаемость ФЭ может привести к снижению инерции и увеличению риска каскадных сбоев (рис. 2).

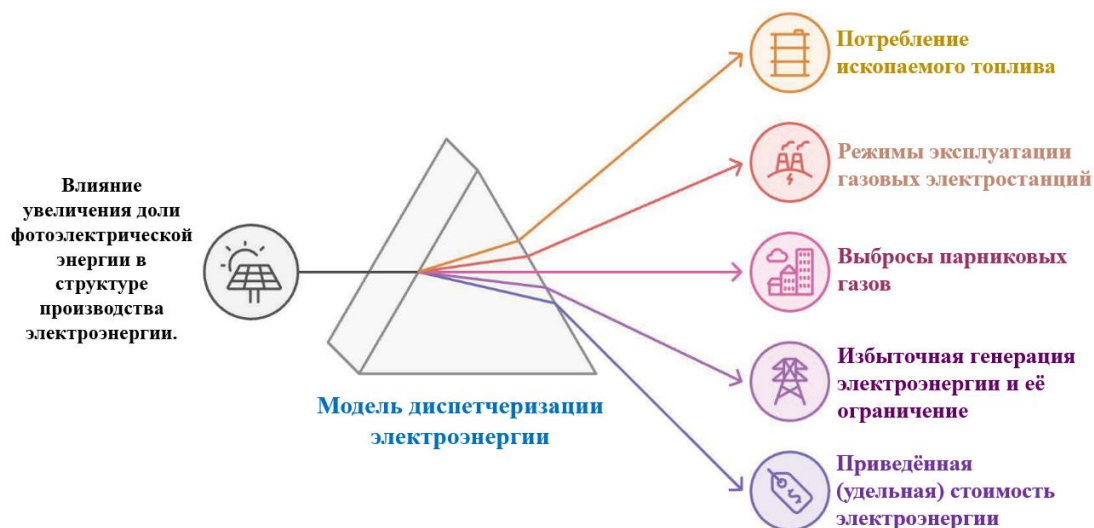


Рис. 2. Влияние крупномасштабной интеграции PV на режимы работы энергосистемы [10].

В отличие от традиционных генераторов, ФЭ не обладают естественной инерцией, что усложняет управление потоками энергии, и исследования подчеркивают, что без адекватных мер локальные нарушения могут распространяться на системный уровень, вызывая каскадные эффекты [11], особенно в условиях высокой изменчивости солнечной генерации, которая требует дополнительных мер по балансировке. На уровне станции основные вызовы обусловлены стохастической природой солнечной энергии, что требует модификации алгоритмов управления инверторами; при этом для активной мощности это включает контроль скорости изменения мощности и её ограничение, а для реактивной — динамическую поддержку напряжения, что особенно важно для предотвращения колебаний напряжения и частоты в сетях с уровнем проникновения PV свыше 30%. В частности, стабильность напряжения представляет собой способность системы поддерживать уровни после возмущений [10], и ФЭ могут улучшать ее, однако изменчивость повышает риск, при этом исследования показывают рост рисков при 40% проникновении [11], а решения включают

реактивный контроль [12], включая динамическую компенсацию для предотвращения коллапса напряжения. Кроме того, угловая стабильность ротора подразумевает сохранение синхронизма [10], и снижение инерции от ФЭ увеличивает риск, но исследования отмечают, что статистический контроль процессов улучшает [11, 12], особенно в комбинации с линиями передачи электроэнергии постоянным током высокого напряжения-линиями для усиления межрегиональной стабильности. Наконец, стабильность частоты страдает от отсутствия инерции [10], поскольку RoCoF растет, и решения предполагают виртуальную инерцию [11, 12], а также интеграцию с энергохранилищами для быстрого отклика, что позволяет поддерживать частоту в пределах 0,5 Гц даже при резких изменениях выработки.

График отражает влияние высокой доли PV на диспетчеризацию генерации, режимы работы газовых электростанций, избыточную мощность и системную устойчивость.

Результаты и обсуждение

1. Стратегии управления и технические решения для интеграции фотоэлектрических систем

Интеграция фотоэлектрических (ФЭ) систем в современные энергосистемы требует фундаментальной трансформации подходов к управлению. Пассивные инверторы превращаются в активные элементы, способные обеспечивать стабильность сети и адаптироваться к реальным условиям, минимизируя влияние изменчивости солнечной генерации [13]. Эта эволюция сочетает продвинутые алгоритмы управления инверторами, системы накопления энергии и комплексные операционные стратегии, учитывающие локальные и системные аспекты. В результате энергосистемы становятся более гибкими и устойчивыми к колебаниям выработки, характерным для возобновляемых источников.

Традиционные методы управления (Таблица 1), такие как ПИ/ПИД-регуляторы, обеспечивают высокую надежность в стационарных режимах благодаря своей простоте и проверенной эффективности, но они ограничены в адаптивности к быстрым динамическим изменениям, типичным для сетей с высокой долей ВИЭ. Эти методы эффективны в стационарных режимах, однако при переменной иррадиации они не справляются с быстрыми изменениями мощности.

Таблица 1. Сравнение традиционных методов управления инверторами ФЭ систем [14–17, 18–21]

Стратегия управления	Ключевые преимущества	Основные ограничения
ПИ/ПР-регуляторы (PI/PR)	Простота реализации, высокая надежность, хорошая точность в стационарном режиме	Низкая адаптивность к динамическим изменениям и работе в "слабых" сетях с переменным импедансом
Управление по методу скользящего режима (SMC)	Высокая робастность к неопределенностям параметров и внешним возмущениям, быстрая динамика	Проблема "дребезга" (chattering), которая увеличивает коммутационные потери и создает высокочастотные помехи
Модельно-прогностическое управление (MPC)	Оптимальная динамика, способность учитывать нелинейности и ограничения системы	Высокая вычислительная сложность, сильная зависимость от точности математической модели системы

Как видно из таблицы, традиционные методы эффективны в стабильных условиях, но требуют дополнения интеллектуальными подходами в динамичных сценариях. Переходя от локального уровня устройств к системным решениям, важную роль играют системы накопления энергии, которые компенсируют снижение инерции в инверторно-

доминированных сетях, предоставляя синтетический инерционный отклик, сглаживая колебания мощности и обеспечивая вспомогательные услуги, такие как регулирование частоты и напряжения.

На уровне инверторов ключевыми задачами остаются точный контроль активной и реактивной мощности, подавление гармоник и обеспечение сетевых услуг, таких как виртуальная инерция или частотное регулирование [14]. Исследования подтверждают, что комбинированное применение традиционных и интеллектуальных методов повышает коэффициент полезного действия (КПД) на 5-10% даже в слабых сетях с высоким импедансом, где традиционные подходы сталкиваются с проблемами стабильности.

Рассмотрим подробнее традиционные методы управления инверторами. К ним относятся ПИ/ПИД-регуляторы, метод скользящего режима (SMC) и модельно-предиктивное управление (MPC). Эти подходы характеризуются простотой реализации и высокой надежностью в стабильных условиях [13]. ПИ/ПИД-регуляторы обеспечивают отличную точность отслеживания в стационарных режимах, но демонстрируют низкую адаптивность в слабых сетях с переменным импедансом, где быстрые изменения приводят к осцилляциям. Скользящее управление предлагает превосходную робастность к внешним возмущениям и быструю динамику отклика, однако страдает от проблемы "дребезга" (дрожание управления), что увеличивает коммутационные потери и износ оборудования [14]. Модельно-прогнозное управление, в свою очередь, учитывает нелинейности системы и ограничения, обеспечивая оптимальное управление, но требует значительных вычислительных ресурсов и точной математической модели, что усложняет применение в реальном времени на недорогих контроллерах.

Исследования показывают высокую эффективность этих методов в стабильных условиях эксплуатации, однако при частичном затенении (PSC-управление с переключаемой структурой) или высоком проникновении ВИЭ необходимы улучшения. Экономически традиционные методы остаются наиболее доступными, снижая начальные затраты, но в условиях растущей доли ФЭ (свыше 30-40%) они не всегда оптимальны, увеличивая зависимость от вспомогательных услуг. Будущие разработки ориентированы на гибридные решения, сочетающие традиционные регуляторы с элементами ИИ для преодоления указанных ограничений [22–24].

В противовес традиционным, интеллектуальные методы управления на основе ИИ эффективно преодолевают их ограничения, предоставляя адаптивность и интеллектуальную обработку данных [13]. Нечеткая логика (FLC - нечёткое логическое управление) позволяет настраивать параметры по лингвистическим правилам, имитируя человеческий опыт и повышая гибкость в неопределенных условиях. Нейронные сети успешно аппроксимируют сложные нелинейности системы, снижая энергозатраты и улучшая отслеживание точки максимальной мощности (MPPT) [14]. Обучение с подкреплением превращает инвертор в "агента", который обучается оптимальным действиям через взаимодействие с окружающей средой, адаптируясь к изменяющимся условиям без точной модели.

Такие методы значительно оптимизируют MPPT, снижая ошибки отслеживания на 20% даже в условиях частичного затенения или быстрых изменений irradiation. Комбинация с традиционными подходами обеспечивает баланс между надежностью и инновациями, минимизируя риски сбоев. Основные вызовы связаны с необходимостью больших объемов данных для обучения и высокой вычислительной нагрузкой, однако современные технологии периферийных вычислений (edge computing) решают эти проблемы [22]. Реальные примеры внедрения в пилотных проектах демонстрируют успех: снижение потерь, повышение стабильности и интеграцию с умными сетями [24-26].

На системном уровне решения дополняются системными подходами, включая аккумуляторные системы накопления энергии и современные операционные практики, которые в совокупности обеспечивают необходимую гибкость всей энергосистемы [13]. Аккумуляторные системы накопления энергии играют ключевую роль в компенсации отсутствия инерции от традиционных генераторов, предоставляя синтетический отклик для

стабилизации частоты, сглаживания пиковых колебаний и участия во вспомогательных услугах. Они существенно снижают объем ограничения генерации избыточной солнечной энергии, повышая экономику проектов, и демонстрируют хорошую окупаемость за счет арбитража цен и снижения пиковых нагрузок [14].

Современные практики операторов энергосистем в ведущих регионах подчеркивают важность комплексного подхода. В Германии акцент делается на укрепление сетевой инфраструктуры, развитие гибкости через виртуальные электростанции и точные прогнозы выработки [13]. В Калифорнии операторы активно используют услуги от самих ФЭ инверторов, управляемый ограничения и масштабное развертывание BESS для балансировки. Во обоих случаях наблюдается растущая зависимость от ИИ для предиктивного управления и оптимизации в реальном времени [14].

Экономические аспекты внедрения этих стратегий играют решающую роль: снижение затрат на ограничения достигает 10-15%, а повышение надежности сети приводит к уменьшению потерь для потребителей. Экологически такие решения способствуют дальнейшему снижению выбросов CO₂, позволяя интегрировать возобновляемые источники энергии без увеличения зависимости от резервов на ископаемом топливе [22]. Тем не менее, остаются вызовы — вычислительная сложность ИИ-моделей и высокая стоимость BESS, — что требует продолжения исследований по оптимизации гибридных моделей и снижению цен на аккумуляторы [23].

В долгосрочной перспективе синергия ИИ с BESS и продвинутыми инверторами позволит создать полностью адаптивные сети, способные к саморегуляции и автоматической оптимизации [24]. Это не только решит текущие технические проблемы интеграции ФЭ, но и внесет значительный вклад в достижение целей устойчивого развития, с акцентом на международную стандартизацию и стимулирующую политику [25]. Общий подход, сочетающий инновации на уровне отдельных устройств с системными моделями планирования, обеспечивает бесшовную и надежную интеграцию фотоэлектрических систем в энергосистемы будущего [26, 27].

Заключение

Будущие направления в интеграции фотоэлектрических (ФЭ) систем в энергосистемы определяются необходимостью повышения их доли до 50-70% к 2050 году, что требует разработки более интеллектуальных, безопасных и адаптивных решений для обеспечения стабильности и эффективности. Текущие вызовы, такие как изменчивость генерации, снижение инерции и интеграция в смарт-гриды, стимулируют исследования в области гибридных технологий, где ФЭ сочетаются с ветровой энергией, хранилищами и ИИ для оптимизации. Ключевые тенденции включают переход к децентрализованным сетям с использованием блокчейна для безопасного энергообмена и ИИ для предиктивного управления, что позволит минимизировать потери и повысить устойчивость к климатическим изменениям.

Выводы из анализа показывают, что успешная интеграция ФЭ зависит от комплексного подхода: от локального уровня инверторов до системного планирования.

1. Перспективные тенденции

Перспективные тенденции в развитии ФЭ систем фокусируются на интеграции передовых технологий для преодоления текущих ограничений, таких как непредсказуемость и низкая интерпретируемость. Основные направления включают гибридные стратегии и повышение безопасности ИИ, что позволит достичь большей эффективности и надежности в энергосистемах.

2. Заключительные выводы

Интеграция ФЭС в современные электросети представляет собой сложную многогранную задачу, требующую скоординированных решений на всех уровнях — от управления отдельными инверторами до планирования и эксплуатации всей энергосистемы. Эта задача обусловлена фундаментальными характеристиками ФЭ, такими как

непредсказуемость и изменчивость выработки, зависящими от метеорологических факторов, что приводит к вызовам в балансировке генерации и нагрузки. Традиционные энергосистемы, ориентированные на детерминированные источники, такие как тепловые станции, не адаптированы к стохастическому поведению ФЭС, что увеличивает риск колебаний частоты, напряжения и общей нестабильности.

Литература

- [1] Elomari, Y., Norouzi, M., Marín-Genescà, M., Fernández, A., Boer, D.: Integration of Solar Photovoltaic Systems into Power Networks: A Scientific Evolution Analysis. *Sustainability*. 14, 9249 (2022). <https://doi.org/10.3390/su14159249>
- [2] Mansouri, N., Lashab, A., Sera, D., Guerrero, J.M., Cherif, A.: Large Photovoltaic Power Plants Integration: A Review of Challenges and Solutions. *Energies (Basel)*. 12, 3798 (2019). <https://doi.org/10.3390/en12193798>
- [3] Panigrahi, R., Mishra, S.K., Srivastava, S.C., Srivastava, A.K., Schulz, N.N.: Grid Integration of Small-Scale Photovoltaic Systems in Secondary Distribution Network—A Review. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 56, 3178–3195 (2020). <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2979789>
- [4] Zubi, G., Parag, Y., Wald, S.: Implications of Large-Scale PV Integration on Grid Operation, Costs, and Emissions: Challenges and Proposed Solutions. *Energies (Basel)*. 18, 130 (2024). <https://doi.org/10.3390/en18010130>
- [5] Rajendran, G., Raute, R., Caruana, C.: A Comprehensive Review of Solar PV Integration with Smart-Grids: Challenges, Standards, and Grid Codes. *Energies (Basel)*. 18, 2221 (2025). <https://doi.org/10.3390/en18092221>
- [6] Yin, J., Molini, A., Porporato, A.: Impacts of solar intermittency on future photovoltaic reliability. *Nat. Commun.* 11, 4781 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18602-6>
- [7] Yao, X., Yi, B., Yu, Y., Fan, Y., Zhu, L.: Economic analysis of grid integration of variable solar and wind power with conventional power system. *Appl. Energy*. 264, 114706 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114706>
- [8] Panigrahi, R., Mishra, S.K., Srivastava, S.C., Srivastava, A.K., Schulz, N.N.: Grid Integration of Small-Scale Photovoltaic Systems in Secondary Distribution Network—A Review. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 56, 3178–3195 (2020). <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2979789>
- [9] Elomari, Y., Norouzi, M., Marín-Genescà, M., Fernández, A., Boer, D.: Integration of Solar Photovoltaic Systems into Power Networks: A Scientific Evolution Analysis. *Sustainability*. 14, 9249 (2022). <https://doi.org/10.3390/su14159249>
- [10] Zubi, G., Parag, Y., Wald, S.: Implications of Large-Scale PV Integration on Grid Operation, Costs, and Emissions: Challenges and Proposed Solutions. *Energies (Basel)*. 18, 130 (2024). <https://doi.org/10.3390/en18010130>
- [11] Mansouri, N., Lashab, A., Sera, D., Guerrero, J.M., Cherif, A.: Large Photovoltaic Power Plants Integration: A Review of Challenges and Solutions. *Energies (Basel)*. 12, 3798 (2019). <https://doi.org/10.3390/en12193798>
- [12] Rezaei, J., Golshan, M.E.H., Alhelou, H.H.: Impacts of integration of very large-scale photovoltaic power plants on rotor angle and frequency stability of power system. *IET Renewable Power Generation*. 16, 2384–2401 (2022). <https://doi.org/10.1049/rpg2.12529>
- [13] Endiz, M.S., Gökkuş, G., Coşgun, A.E., Demir, H.: A Review of Traditional and Advanced MPPT Approaches for PV Systems Under Uniformly Insolation and Partially Shaded Conditions. *Applied Sciences*. 15, 1031 (2025). <https://doi.org/10.3390/app15031031>
- [14] Mao, M., Cui, L., Zhang, Q., Guo, K., Zhou, L., Huang, H.: Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies. *Energy Reports*. 6, 1312–1327 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.05.013>
- [15] Francisti, J., Fodor, K., Balogh, Z., Magdin, M.: Predictive modeling and anomaly detection in solar PV inverters using machine learning. *Results in Engineering*. 28, 108348 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108348>

- [16] Iturralde Carrera, L.A., Alfonso-Francia, G., Constantino-Robles, C.D., Terven, J., Chávez-Urbiola, E.A., Rodríguez-Reséndiz, J.: Advances and Optimization Trends in Photovoltaic Systems: A Systematic Review. *AI*. 6, 225 (2025). <https://doi.org/10.3390/ai6090225>
- [17] Singh, D., Shah, O.A., Arora, S.: Adaptive control strategies for effective integration of solar power into smart grids using reinforcement learning. *Energy Storage and Saving*. 3, 327–340 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enss.2024.08.002>
- [18] Kolamroudi, M.K., Jaiyeoba, O.H., Ilkan, M., Safaei, B.: A comprehensive review on the artificial intelligence for the development of thermal concentrating photovoltaic systems. *Solar Energy*. 301, 113937 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113937>
- [19] Hadavi, A., Tarafdar Hagh, M., Ghassem Zadeh, S.: Frequency stability in modern power systems with 100% renewable energy penetration. *Results in Engineering*. 28, 108168 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108168>
- [20] Dulal, S., Olama, M., Thotakura, N.L., Liu, Y.: Inertia estimation for power grids: A review of methods, challenges, and future prospects. *Appl. Energy*. 407, 127333 (2026). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.127333>
- [21] Fasasi, B., Adeniyi, I.S.: Frequency regulation and stability enhancement of inverter-based renewable power systems. *International Journal of Science and Research Archive*. 17, 521–531 (2025). <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.17.2.3043>
- [22] Chatzigeorgiou, N.G., Theocharides, S., Makrides, G., Georghiou, G.E.: A review on battery energy storage systems: Applications, developments, and research trends of hybrid installations in the end-user sector. *J. Energy Storage*. 86, 111192 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111192>
- [23] Gilabert-Torres, C., Rus-Casas, C., Jiménez-Castillo, G., Muñoz-Rodríguez, F.J.: Photovoltaic systems with battery storage: A novel and comprehensive scheduling method for high-consumption facilities. *J. Energy Storage*. 139, 118858 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118858>
- [24] Jaradat, T., Khatib, T.: A review of battery energy storage system for renewable energy penetration in electrical power system: Environmental impact, sizing methods, market features, and policy frameworks. *Future Batteries*. 7, 100106 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.fub.2025.100106>
- [25] Ergun, S., Dik, A., Boukhanouf, R., Omer, S.: Large-Scale Renewable Energy Integration: Tackling Technical Obstacles and Exploring Energy Storage Innovations. *Sustainability*. 17, 1311 (2025). <https://doi.org/10.3390/su17031311>
- [26] Pudur, R., Rajak, M.K.: A comprehensive review of grid-connected inverter topologies and control strategies (2020–2025). *Next Energy*. 9, 100433 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100433>
- [27] Ali, A.O., Elgohr, A.T., El-Mahdy, M.H., Zohir, H.M., Emam, A.Z., Mostafa, M.G., Al-Razgan, M., Kasem, H.M., Elhadidy, M.S.: Advancements in photovoltaic technology: A comprehensive review of recent advances and future prospects. *Energy Conversion and Management: X*. 26, 100952 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100952>