

РАЗВИТИЕ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ВЕТРОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ: ПРОКЛАДЫВАЯ ПУТЬ К ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫМ ЭНЕРГОСИСТЕМАМ

Сюй Цзыцй, магистрант
Российский университет транспорта
(Россия, г. Москва)

DOI:10.24412/2500-1000-2023-11-4-115-122

Аннотация. В статье рассматривается важность развития диспетчеризации ветровой электроэнергии для обеспечения энергетической устойчивости и отказоустойчивости в энергосистемах. Основные направления развития включают в себя прогнозирование ветровых условий с применением передовых методов, таких как искусственный интеллект и машинное обучение. Интеграция с хранилищами энергии, управление нагрузкой и развитие систем управления играют ключевую роль в сглаживании колебаний в производстве ветроэнергии. Улучшение сетевой инфраструктуры, стандарты и нормативы, а также исследования новых технологий содействуют созданию энергосистем, устойчивых к отказам. Комплексный подход, включающий технологические, организационные и регуляторные меры, помогает прокладывать путь к энергетической устойчивости и повышает отказоустойчивость ветроэнергетических систем.

Ключевые слова: диспетчеризация ветровой энергии, энергетическая устойчивость, отказоустойчивость энергосистем, прогнозирование ветровых условий, интеграция с хранилищами энергии.

Основной принцип работы ветроэнергетических систем - преобразование кинетической энергии движущегося воздуха в механическую энергию вращающегося ветрогенератора. Ветрогенератор состоит из трех основных компонентов. Лопастей устанавливаются на высокой мачте и наводятся на ветер. Когда ветер дует, он приносит энергию вращению лопастей. Вращение лопастей приводит в движение генератор, который преобразует механическую энергию в электрическую. Электроэнергия, производимая ветрогенератором, передается через систему управления и соединяется с электрической сетью.[1]

Преимущества ветроэнергетических систем:

1. Ветер бесконечен и доступен в большинстве регионов мира, что делает ветроэнергию надежным источником возобновляемой энергии.

2. Ветроэнергия не производит выбросов парниковых газов, что способствует борьбе с изменением климата.

3. Ветроэнергия становится все более конкурентоспособной с течением времени, и стоимость ее производства снижается.

4. Индустрия способствует созданию рабочих мест, включая технические и инженерные специальности.

5. Ветроэнергия помогает уменьшить зависимость от традиционных источников энергии, таких как уголь и нефть [2].

Ветроэнергетика переживает впечатляющий рост. Современные технологии позволяют строить более эффективные ветрогенераторы, способные работать при низких скоростях ветра, а также в более экстремальных климатических условиях. Все больше стран вкладывают средства в развитие ветроэнергетики и увеличивают долю ветроэнергии в своих энергетических миксах. Создание более эффективных систем хранения энергии и улучшение инфраструктуры для передачи ветроэнергии также стимулируют рост этой отрасли. Исследования в области ветроэнергии также активно ведутся с целью улучшения производительности и снижения затрат [3].

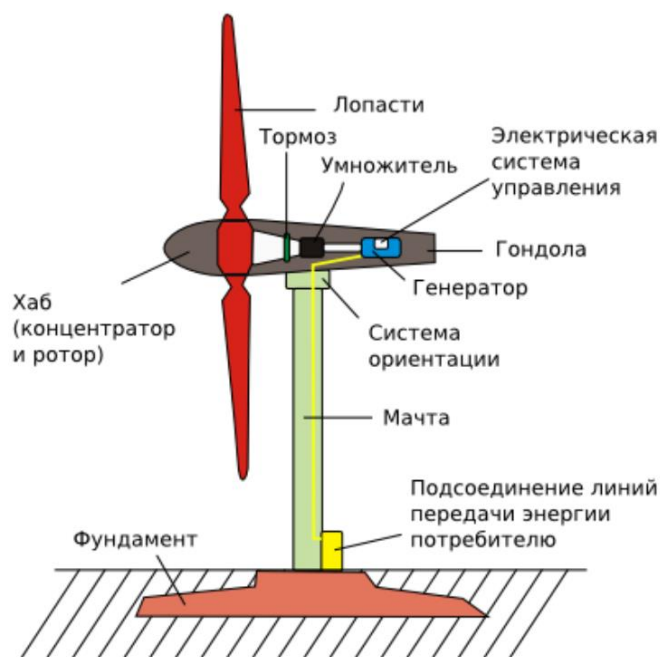


Рис. 1. Принцип работы ветряного электрогенератора

Ветряная установка представляет собой башню с навесом (накомплектованную анемометрами, ветродатчиками и авиационными огоньками), а также ротор с лопастями и ступицей. Большинство современных ветряных установок имеют три лопасти и размещаются перед башней и навесом. Навес содержит ключевые компоненты ветряной установки, включая коробку передач, механические тормоза, электрогенератор, системы управления и другие. Ветряные установки устанавливаются не только на суше в разброс, но также объединяются в фермы мощностью в сотни мегаватт, что сравнимо с современными генераторами электроэнергии [4]. Существуют три типа ветрогенераторных систем: постоянной скорости с индукционным генератором, переменной скорости с двойно-подпитываемым индукционным генератором и переменной скорости с синхронным генератором или индукционным генератором. Трансформаторы используются для поднятия напряжения, а дальнейшая передача энергии может осуществляться как на наземных, так и подводных высоковольтных линиях.

Разработка математических моделей, учитывающих изменчивость и непредсказуемость ветровых условий для прогнозирования генерации ветроэнергии является ключевой задачей в современной энергетике. Ветроэнергия играет важную роль в мировом энергетическом балансе, и понимание и учет ее variability является необходимым условием для эффективного планирования и управления ветровыми электростанциями. Численные модели используют физические уравнения атмосферы и гидродинамики для симуляции ветровых условий, они могут учитывать сложные факторы, такие как рельеф местности и местные особенности, но они требуют больших вычислительных ресурсов и детальных данных. Модели, основанные на машинном обучении, могут анализировать большие объемы данных и выявлять неявные закономерности в изменчивости ветра, они могут быть обучены на реальных данных и использоваться для коррекции прогнозов. Сбор и интеграция данных с метеорологических станций, радаров и спутников позволяют создать более точные модели, которые учитывают текущие условия и изменения в атмосфере.

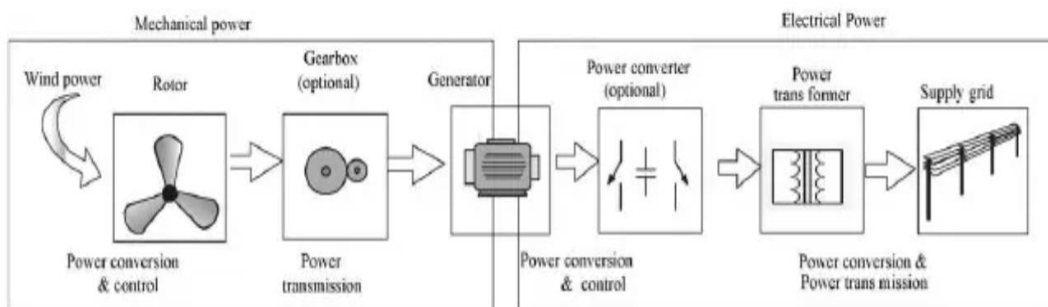


Рис. 2. Основные компоненты турбины

Итак исследуя российские и зарубежные источники, можно выделить ряд проблем существующих в области диспетчеризации и вообще выработки ветроэлектротенергии, я хочу их привести, чтобы позже в разрезе этих проблем освещать возможные существующие методы оптимизации, как сокращающие негативные стороны в общей сумме так и в частности, вот эти проблемы [5]: ветроэнергетика зависит от силы ветра, что делает ее производство электротенергии непостоянным и неравномерным, что приводит к проблемам в управлении энергосистемой. Электротенергия, производимая ветрогенераторами, имеет большие колебания как в суточном, так и в более длительных периодах времени, что усложняет интеграцию. Введение ветроэнергии в энергосеть требует наличия резерва мощности, чтобы компенсировать изменчивость ветра и поддерживать стабильность системы. Для сглаживания неравномерности в производстве электротенергии необходимы механизмы, такие как гидроаккумулирующие электротенстанции, чтобы аккумулировать излишки энергии. Малые ветроустановки могут столкнуться с проблемами в сетевой инфраструктуре и расходами на подключение. В зимний период лопасти ветрогенераторов могут обледеневать, что требует предупреждающих мер и может вызвать радиопомехи. Ремонт крупногабаритных деталей ветроустановок на больших высотах является сложным и дорогостоящим процессом. Металлические элементы ветроустановок могут создавать радиопомехи, которые требуют установки дополнительных ретрансляторов, увеличивая затраты.

Оптимизация расположения ветряных турбин – это сложная и многогранная проблема, которая становится все более важной в контексте развития ветряной энергетикки как одного из основных источников возобновляемой энергии. Эффективное расположение ветряных турбин влияет на производительность ветряной фермы и, следовательно, на ее экономическую эффективность. Существует несколько методов для оптимизации расположения ветряных турбин, включая генетические алгоритмы, эволюционные алгоритмы, алгоритмы роя частиц, методы имитации отжига и другие.

Однако большинство исследований по оптимизации расположения ветряных ферм предполагают, что турбины работают независимо друг от друга, и не учитывают кооперативное управление, что не соответствует реальности работы ветряных ферм. Существующие исследования также часто разделяют оптимизацию расположения и управления, что исключает возможность совместного использования их потенциальных преимуществ. Не так давно была разработана двухэтапная модель оптимизации, которая учитывает управление ветряной фермой для разных направлений ветра на весь спектр условий ветра, но данная модель сталкивается с проблемой высокой вычислительной сложности из-за большого числа переменных. Для решения этой проблемы был предложен метод разложения на подзадачи, который позволяет улучшить вычислительную эффективность оптимизации [6].

Существует еще такой оптимальный метод, распределенная генерация электротенергии (Distributed Generation, DG), пред-

ставляет собой установку небольших устройств для производства электроэнергии непосредственно у потребителей в распределительной сети. DG может быть разделена на возобновляемые и невозобновляемые источники. Возобновляемые DG включают в себя солнечные, ветровые, геотермальные и океанические источники энергии, они считаются более экологичными, так как обычно имеют минимальный выброс углекислого газа и других загрязнителей в процессе производства электроэнергии по сравнению с традиционной центральной тепловой генерацией, использующей ископаемое топливо. Инертность системы уменьшается после подключения DG, что вызывает проблемы с напряжением и частотой. Возобновляемые источники энергии неуправляемы и могут вызывать проблемы с качеством электроэнергии из-за интермиттентности. Для решения этих проблем предлагается использование систем хранения энергии (Energy Storage Systems, ESS), которые могут накапливать избыточную энергию и стабилизировать напряжение и частоту в сети [7].

Обеспечение стабильной, надежной и экономически эффективной работы системы в условиях массовой интеграции ветряной энергии представляет собой большой вызов для операторов электроэнергетических систем. Для этого были разработаны технические характеристики и правила подключения ветряных установок к сети (как к большим морским ветровым фермам, так и к сетям высокого напряжения, а также к местным ветроустановкам, подключаемым к распределительным сетям) [8].

Примеры таких требований включают в себя возможность вклада в регулирование частоты и напряжения, контролируя активную и реактивную мощность, поставляемую в электроэнергетическую систему, а также способность к работе при низком напряжении (Low Voltage Ride-Through Capability). Требования к активной мощности и управлению частотой включают в себя линейное регулирование активной мощности в пределах определенного диапазона частот (47-52 Гц) с установленной

зоной нечувствительности (49.85-50.15 Гц) и регулирующей скоростью 10% от номинальной мощности в секунду. Требуется способность уменьшить производство ветряной установки с полной нагрузки до уровня от 0% до 20% за несколько секунд. Также обсуждаются вопросы, связанные с балансом мощности, флуктуациями напряжения и качеством электроэнергии. С увеличением интеграции ветряной энергии в систему требования к регулированию и контролю становятся более важными. Большие морские ветровые фермы могут внести значительные флуктуации мощности в систему, что может повлиять на соседние электроэнергетические системы, если не будет применен адекватный контроль. Такие фермы могут производить интенсивные флуктуации активной мощности, что может вызвать изменение выходной мощности фермы в пределах от нуля до номинальной мощности в течение 10-15 минут. Регулирование активной и реактивной мощности, прогнозирование скорости ветра и использование системы контроля на уровне области (Area Grid Controller) с применением вторичного управления для центральных электростанций и связи с соседними энергосистемами, включая системы высоковольтного постоянного тока (HVDC), могут быть эффективными способами управления флуктуациями ветряной энергии и поддержания стабильной работы системы. С увеличением интеграции ветряной энергии потребуется более высокая способность регулирования системы [9].

Система хранения энергии на батареях (BESS) признается одним из лучших решений для компенсации колебаний ветровой мощности и ошибок в прогнозе ветровой мощности. Множество исследований были проведены в области гибридных систем ветроэлектростанции-батареи.

Современные исследования предлагают стратегию, основанную на использовании BESS и ветряных систем для оптимизации мощности и емкости батарей и увеличения их срока службы. В предложенной стратегии используется среднее значение ветровой мощности как передаваемая мощность, чтобы уменьшить мощность бата-

рей, и два набора батарей используются для предотвращения мелких циклов зарядки и разрядки для продления срока службы батарей. Также анализируется краткосрочная работа с учетом влияния ошибок прогноза на требуемую мощность батареи [10].

Ветровая энергия имеет колебания в пределах интервала времени менее 1 часа, даже в пределах минут, и поэтому она не

постоянна для заданного интервала, также надо отметить, что ошибка в прогнозе приводит к отклонению диспетчируемой мощности от реальной мощности, поэтому используется стратегия гибридной системы ветро-аккумулятора для компенсации колебаний мощности и ошибок в прогнозе. Схема гибридной системы ветро-аккумулятора с одним аккумулятором показана на рисунке 2.

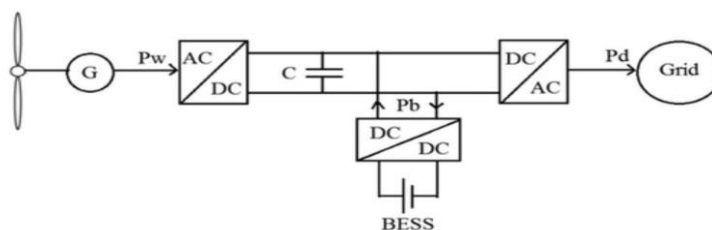


Рис. 3. Схема гибридной ветровой системы с одной батареей

Передаваемая мощность – это объем мощности, который должен быть представлен на рынке электроэнергии за несколько часов до ее передачи. Обычно это определяется как запланированная мощность на следующий интервал передачи. Существуют два общих подхода к определению передаваемой мощности с учетом ветровой энергии.

Первый подход основан на среднем значении оцененной ветровой энергии, которое рассматривается как передаваемая мощность для каждого интервала передачи, данный метод приводит к быстрой

смене режима аккумулятора (зарядка или разрядка) в зависимости от знака мощности аккумулятора, что приводит к множеству неглубоких циклов зарядки и разрядки аккумулятора.

Второй подход основан на минимальном и максимальном значении ветровой энергии, в зависимости от режима аккумулятора (зарядка или разрядка), данный метод приводит к полным циклам зарядки и разрядки аккумулятора, что улучшает срок службы аккумулятора, но требует более крупной емкости аккумулятора и, следовательно, более высоких затрат.

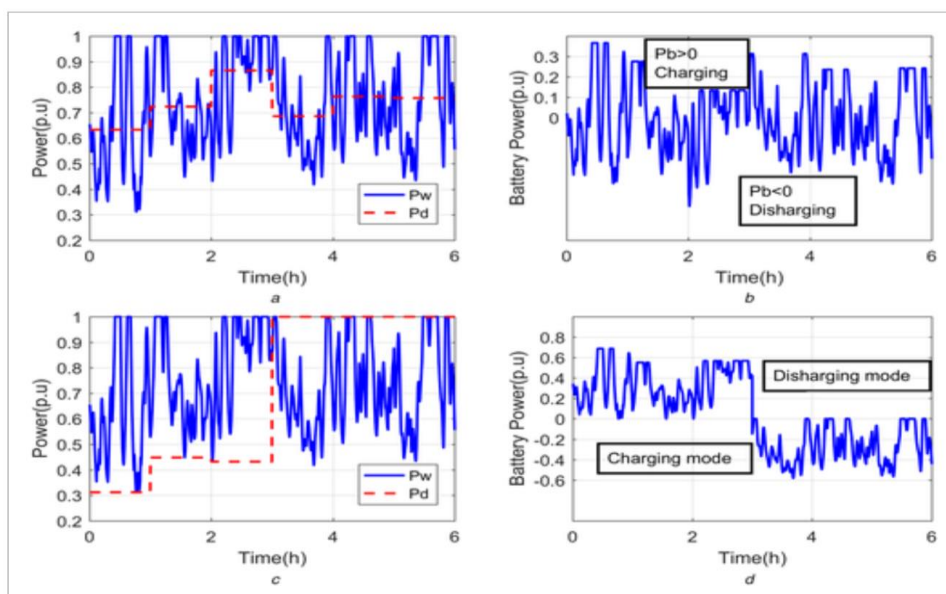


Рис. 4. Циклы зарядки и разрядки батареи (неглубокие)

Оба метода имеют свои преимущества и недостатки, и выбор между ними зависит от конкретных условий и требований. Первый метод требует аккумулятор с меньшей емкостью, но приводит к множеству неглубоких циклов. Второй метод улучшает срок службы аккумулятора, но требует более крупной емкости и может быть более дорогим, но первый метод более реалистичен с точки зрения прогнозирования мощности ветра, так как требует лишь прогнозирования среднего значения ветровой энергии [11].

Сравнивая предложенную стратегию с другими методами, нужно сказать что тре-

буется одинаковая мощность для диспетчеризации энергии во всех методах, но требуемая мощность батареи в предложенном методе меньше, чем в методе min-taux, который требует максимальной разницы между минимальными и максимальными значениями ветровой мощности, также надо отметить что для энергетической емкости предложенного метода учитывается полный цикл, что также позволяет уменьшить емкость батареи по сравнению с другими методами, так как первый метод требует меньшей энергетической емкости из-за более коротких циклов заряда-разряда [12].

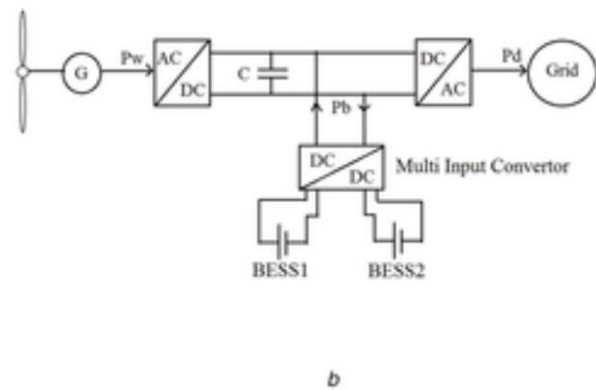
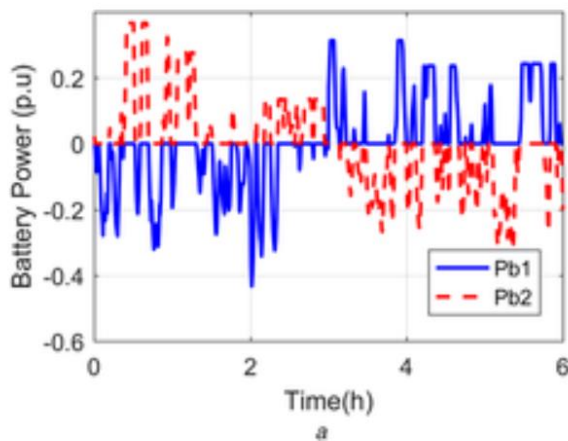


Рис. 5. Современная предлагаемая система с двумя аккумуляторами

Еще существует модель жесткой оптимизации. Модель жесткой оптимизации (RO) для предварительной диспетчеризации ветровой энергии представляет собой мощный инструмент, разработанный для эффективного управления генерацией электроэнергии из ветровых источников, такая модель призвана учитывать неопределенности и переменность ветровых условий, что является одним из основных вызовов в интеграции ветровой энергии в энергетическую систему. Рассмотрим основные аспекты модели жесткой оптимизации для предварительной диспетчеризации ветровой энергии и её роль в развитии возобновляемой энергетики. Ветровая энергия является переменной и неопределенной формой возобновляемой энергии. Скорость ветра и направление могут изменяться в течение короткого времени, что затрудняет точное прогнозирование про-

изводства ветровой энергии. RO-модель разрабатывается с учетом этой неопределенности, позволяя эффективно управлять генерацией ветровой энергии, уменьшая риски и эксплуатационные затраты. Основная цель RO-модели для предварительной диспетчеризации ветровой энергии заключается в оптимизации использования ветровых ресурсов. Модель учитывает не только текущие ветровые условия, но и прогнозирует будущее, что позволяет эффективно распределять ресурсы для максимизации выработки ветровой энергии.

Стремительное развитие возобновляемых источников энергии, включая ветряную энергию, обуславливает необходимость эффективного управления и интеграции таких источников в современные энергетические системы.

Основываясь на представленных в статье данных, можно сделать следующие выводы:

Вопрос диспетчеризации ветровой электроэнергии требует комплексного и гибкого подхода, учитывающего разнообразие ветровых условий и изменчивость ветра.

Два основных метода определения передаваемой мощности, основанные на среднем и минимальном/максимальном значении ветровой энергии, предоставляют разные преимущества и недостатки. Выбор между ними зависит от конкретных условий и требований.

Предложенная стратегия, использующая комбинацию обоих методов с использованием двух наборов батарей, предоставляет оптимальный баланс между мощностью и сроком службы батареи, что может быть ключевым решением для увеличения эффективности системы.

Модель жесткой оптимизации (RO) представляет собой мощный инструмент для управления ветровой энергией, учитывая неопределенность ветровых условий, и может снизить риски и эксплуатационные затраты.

Статья подчеркивает важность разработки и внедрения современных стратегий и моделей для диспетчеризации ветровой электроэнергии. Эффективное управление ветровой энергией является ключевым фактором для обеспечения стабильности и устойчивости современных энергетических систем, а также для увеличения доли возобновляемых источников энергии в энергетическом миксе. Дальнейшие исследования и инновации в этой области играют важную роль в обеспечении энергетической устойчивости и уменьшении негативного воздействия на окружающую среду.

Библиографический список

1. Владимир Сидорович. Мировая энергетическая революция: Как возобновляемые источники энергии изменят наш мир. – М.: Альпина Паблишер, 2015.
2. Фатеев Е.М. Вопросы ветроэнергетики. Сборник статей. Издательство АН СССР, 1959. БИКИ, 25.07.09 г., «На рынке ветроэнергетического оборудования КНР».
3. Современные проблемы энергосбережения и пути оптимизации использования электрической энергии / Д.П. Омельченко, И.П. Уваров // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 103.
4. Д. де Рензо, В.В. Зубарев. Ветроэнергетика. – Москва. Энергоатомиздат, 1982.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/vozobnovlyaemye-istochniki-energii/663245-perspektivy-razvitiya-vetroenergetiki-v-rossii/>.
6. Nguyen N., Mitra J. An analysis of the effects and dependency of wind power penetration on system frequency regulation // IEEE Trans. Sustain. Energy. – 2016. – № 7 (1). – Pp. 354-363
7. Shensi, S., Yue, Z., Zheng, L. et al.: 'Grid code for wind power fluctuation in China and particle swarm optimization-based power dispatch solution // Renew. Sustain. Energy. – 2015. – №7. – P. 013118
8. Chowdhury, M., Rao, M., Zhao, Y. et al. Benefits of storage control for wind power producers in power markets // IEEE Trans. Sustain. Energy. – 2016. – №7 (4). – Pp. 492-1505.
9. Morales J.M., Conejo A.J., Madsen H. et al. Integrating renewables in electricity markets // International Series in Operations Research & Management Science. – 2014. – Vol. 205.
10. Elatar E.E. Prediction of wind power based on evolutionary optimised local general regression neural network // IET Gener. Transm. Distrib. – 2014. – № 8 (5). – P. 916-923.
11. Huang C., Kuo C., Huang Y. Short-term wind power forecasting and uncertainty analysis using a hybrid intelligent method // IET Renew. Power Gener. – 2017. – №11 (5). – Pp. 678-687.
12. Wenxia P., Bo F., Jianhong Z. An analysis of capacity requirements of battery energy storage based on forecasted wind power correction // Int. Conf. Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN), Hangzhou, China, September 2012.

ADVANCING WIND POWER DISPATCH: PAVING THE PATH TO ENERGY RESILIENCE AND RESILIENT POWER SYSTEMS

Xu Ziqi, *Graduate Student*
Russian University of Transport
(Russia, Moscow)

Abstract. *The article discusses the importance of developing wind power dispatch to ensure energy sustainability and fault tolerance in power systems. Key development areas include forecasting wind conditions using advanced techniques such as artificial intelligence and machine learning. Integration with energy storage, load management and the development of control systems play a key role in smoothing fluctuations in wind energy production. Improved grid infrastructure, standards and regulations, and research into new technologies are helping to create fault-tolerant power systems. An integrated approach, including technological, organizational and regulatory measures, helps pave the way to energy sustainability and improve the resiliency of wind energy systems.*

Keywords: *wind energy dispatch, energy resilience, power system resiliency, wind condition forecasting, energy storage integration.*