УДК 621.316.7

# ДИСПЕТЧЕРСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИБРИДНО-ВЕТРЕНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ И СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ
# CONTROL SYSTEM FOR A HYBRID WIND POWER PLANT AND ENERGY STORAGE SYSTEM

К.Д. Денисенков, А.А. Цалко
Научный руководитель – Т.Д. Ковалева, ассистент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск
K. Denisenkov, A. Tsalko
Supervisor – T. Kovaleva, Assistant
Belarusian national technical university, Minsk

***Аннотация:*** *В статье рассматриваются системы накопления энергии, номинальные мощности и энергия систем управления, технические аспекты, использование систем накопления энергии для снижения колебания мощности ветра.*
***Abstract:*** *The use of energy storage systems to reduce fluctuations in wind power, the use of energy storage systems to reduce fluctuations in wind power.*
***Ключевые слова:*** *система накопления энергии, ветреная электростанция.*
***Keywords:*** *energy storage system, wind power plant.*

## Введение

Для решения данной глобальной проблемы исчерпание запасов ископаемого топлива, стоит не забывать, что ветер считается чистым и неограниченным ресурсом, главной проблемой, препятствующей широкому проникновению ветроэнергетики на рынок электроэнергии, является перебои в использовании энергии ветра. Значительные колебания мощности ветра, подаваемого в сеть, могут отрицательно сказываться на качестве электроэнергии и надежности сети, привести к тому, что энергия ветра не будет распределяться равномерно. По этой причине инженерам, которые занимаются разработкой ветроэнергетических систем, очень важно учитывать проблему прерывистого ветряного потока, перед тем как преобразовать ветряную энергию в электрическую.

## Основная часть

Системы накопления энергии (СНЭ) были введены для того, чтобы уменьшить влияние прерывистости ветряного потока, СНЭ является одним из вариантов решений данной проблемы. Сочетание СНЭ с системой преобразования энергии ветра приводит к созданию гибридной системы, в которой СНЭ играет роль энергетического буфера для компенсации прерывистости энергии ветра. В частности, можно применять аккумуляторные системы накопления энергии (АСНЭ), встроенные в ветроэлектростанцию (ВЭ), которые служат для распределения постоянной мощности в течение каждого интервала диспетчеризации.

На практике применяются NAS-аккумулятор с емкостью 254 МВт·ч, установленный для стабилизации ветроэлектростанции мощностью 51 МВт,

литий-ионный аккумулятор емкостью 2 МВт·ч, встроенный в ветроэлектростанцию мощностью 4,5 МВт, и сверхпроводящий магнитный накопителя энергии емкостью 1 кВт·ч. (АСНЭ) для того чтобы устранения колебаний мощности ветряной турбины мощностью 1 МВт [1]. Это показывает, что использование СНЭ является приемлемым решением.

В то время как СНЭ обеспечивает ВЭ стабильной подачей электроэнергии в сеть, оно в свою очередь приводит к такому, что ветроэнергетические системы являются дорогостоящими. Большие затраты на накопители требуют экономии мощности СНЭ, поэтому было принято решение сосредоточиться на оптимизации работы гибридной ветреной аккумулирующей системы. В оптимальной системе способ распределения электроэнергии в сеть определяет поток накопленной энергии; следовательно, стратегия распределения электроэнергии играет ключевую роль и должна быть определена в первую очередь. Благодаря фильтрам нижних частот определяется распределение мощности и оптимальное управление системой ветряных батарей. В настоящее время ветреная аккумулирующая система оптимизирована на основе стратегии диспетчеризации электроэнергии, которая определяет оптимальную постоянную диспетчеризацию мощности в каждом временном интервале диспетчеризации. Другим методом диспетчеризации электроэнергии является регулирование скорости нарастания мощности. Ее целью является ограничение скорости нарастания мощности в определенном диапазоне.

Ветроэнергетическая система и система накопления энергии. На рисунке 1 расположена конфигурация гибридной ветряной и аккумулирующей системы, в которой как генератор ВЭ, так и СНЭ подключены к сети в точке общего подключения (ТОП) через свои системы преобразования энергии $P_{сп1}$ и $P_{сп2}$. В то время как выходная мощность генератора $P_г$ и блока распределения мощности $P_р$ всегда положительная, выходная мощность СНЭ $P_э$ может выдавать положительную или отрицательную мощность, чтобы соответственно заряжать или разряжать накопитель. Если пренебречь потерями мощности в системе, то мощность СНЭ $P_э$ можно рассчитать следующим образом:

$$P_э = P_г - P_р. \quad (1)$$

Гибридная ветреная аккумулирующая система имеет в себе два контроллера для решения различных задач: один управляет работой ветряной турбины, фокусируясь на максимальном извлечении энергии, в то время как второй управляет системой накопления энергии (СНЭ), чтобы сбалансировать переменную мощность ветра с требуемой, управлять уровнем заряда, обеспечивать бесперебойное питание от сети. Такое распределение функций позволяет оптимизировать производительность как при производстве, так и при распределении энергии, что является более эффективным способом, чем использование одного контроллера, который пытается справиться с обоими сложностями одновременно. В свою очередь, использование двух контроллеров удорожает систему.

Номинальные мощность и энергия СНЭ. Минимальное требование к производительности СНЭ, которое обычно указывается в виде номинальной

энергии $E_{э.\ ном}$ и номинальной мощности $P_{э.\ ном}$, определяется на основе распределения мощности и специализации выходной мощности ВЭ.

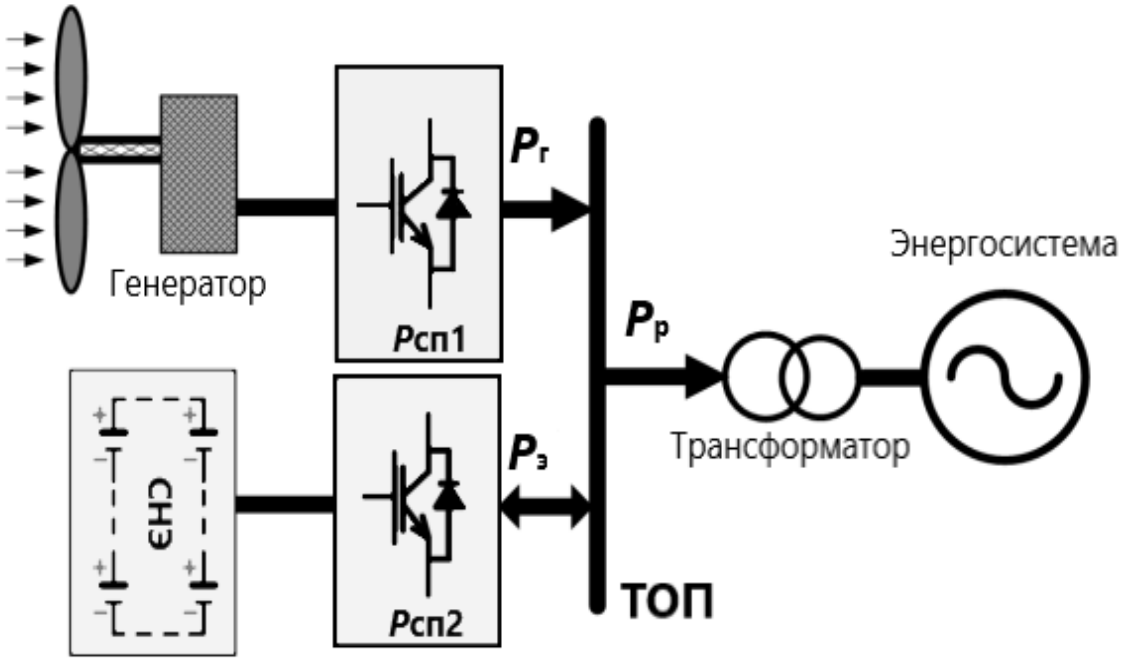


Рисунок 1 – Конфигурация гибридной ветряной и аккумулирующей системы

Принимая во внимание, что система работает в течение периода времени $T$, номинальная мощность СНЭ определяется как:

$$P_{э.\,ном.} = \max_{0 \le t \le T} |P_э(t)| = \max_{0 \le t \le T} |P_Г(t) - P_р(t)|. \quad (2)$$

Интегрируя мощность ЭСН с учетом времени, мы получаем:

$$E_э(t) = \int_0^t (P_э(\tau)\mathrm{d}\tau = \int_0^t [P_г(\tau) - P_р(\tau)]\mathrm{d}\tau. \quad (3)$$

На уровне с номинальной мощностью, показатель энергопотребления представляет собой максимальный диапазон энергопотребления, который может быть накоплен или использован СНЭ при работе системы в течение периода $T$, и определяется следующим образом:

$$E_{э.\,ном} = \max_{0 \le t \le T} |E_э(t)| - \min_{0 \le t \le T} |E_э(t)|. \quad (4)$$

Рассмотрение технических аспектов СНЭ.

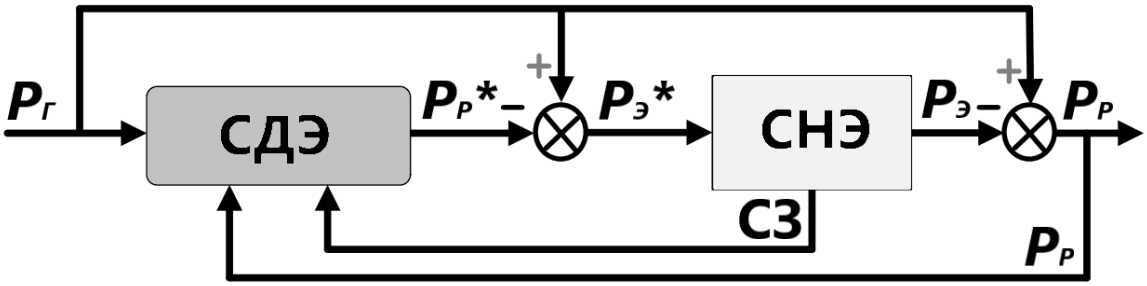


Рисунок 2 – Принцип диспетчерского управления энергией гибридной ветряной аккумулирующей системы

На рисунке 2 показан принцип управления распределением электроэнергии в гибридной ветреной аккумулирующей системе, в которой ключевую роль играет стратегия диспетчеризации электроэнергии (СДЭ). Команда распределения мощности $P_р^*$ выводится из СДЭ на основе мощности ветра, распределения мощности и состояния заряда (СЗ) СНЭ, а мощность СНЭ регулируется с помощью персонального компьютера (ПК), как показано на рисунке 1. Во время эксплуатации системы необходимо строго учитывать техническую информацию СНЭ, которая включает состояние заряда и глубину разряда (ГР). Чтобы предотвратить чрезмерную загрузку хранилища, системный контроллер должен поддерживать СЗ в надлежащем диапазоне (примерно от 20 % до 90 %). Кроме того, высокая глубина разряда приводит к значительному сокращению срока хранения, так что ГР необходимо ограничивать во время выгрузки; а максимальная глубина разряда обычно составляет менее 80 %.

**Заключение**

В будущем предполагается, что ветряная электроэнергия будет занимать ключевую роль, это приведет к сокращению части рынка электростанций, таких как тепловые, гидроэлектростанции и атомные электростанции. В таком будущем, оператор системы передачи должен быть готов к тому, что ВЭ сможет обеспечить требуемую мощность таким же образом, как это делали электростанции. Иными словами, стратегия диспетчеризации электроэнергии должна иметь возможность взаимодействовать с ОПС, чтобы отправлять расписание диспетчеризации электроэнергии ВЭ на несколько часов вперед, а затем в каждом следующем интервале диспетчеризации ВЭ должен подавать питание для выполнения этого плана. Поэтому, в зависимости от сетевых кодов, собственники ВЭ должны выбрать подходящую стратегию распределения электроэнергии, чтобы минимизировать стоимость системы и соответствовать требованиям сетевого кода.

**Литература**

1. Experience of Jeju smart grid test-bed. For the 3rd session “Island Case Studies” Feb. 2013 – Madrid, 2013 – URL: http://www.ifema.es/ferias/genera/2013/jornadas/ree28/man_geun.pdf. (date of access:25.10.2025).

2. V112-3.0MW – Copenhagen, 2013 – URL: http://creativeenergyalternatives.com/wind/Vestas_V_112_web_1003_09.pdf. (date of access:25.10.2025).

3. “A Review of Energy Storage Technologies for Wind Power Applications”/ D. G. Francisco, S. Andreas, G. B. Oriol, and V. R. Roberto. – Limassol: Renew. & Sustain. Energy Reviews, 2012 – vol. 16, no. 4, pp. 2154–2171.