

## Обзор топологий соединения накопителей энергии и методы их контроля

*А.А. Самойлова*

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

**Аннотация:** В настоящее время одним из перспективных направлений в мировой энергетике является внедрение в существующую сеть возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Применение ВИЭ может быть выгодно в автономных энергосистемах, где высоки затраты на топливо. Однако стохастический характер выработки электроэнергии создает ряд сложностей с сохранением баланса мощности. Для решения этой проблемы предлагается подключать к шинам нагрузки гибридную систему накопления энергии (ГСНЭ), состоящую из аккумуляторной батареи и суперконденсатора. Эффективность такой ГСНЭ зависит в большей части от способа ее подключения к сети и выбора метода контроля. В статье приведен обзор существующих механизмов управления электропотреблением ГСНЭ.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, гибридный накопитель электроэнергии, топология преобразования мощности, стратегия управления накопителя электроэнергии.

В настоящее время возобновляемые источники энергии (ВИЭ), в частности, ветроустановки и солнечные фотоэлектрические модули, являются экономически эффективными в автономных энергосистемах, где основным источником энергии служат дизельные установки. Использование ВИЭ может значительно снизить систематические затраты на топливо, а также эксплуатационные расходы.

Из-за стохастического характера выработки ВИЭ и переменного спроса на электроэнергию, ВИЭ не всегда могут самостоятельно обеспечить необходимый уровень выработки. Для обеспечения бесперебойного питания нагрузки при приемлемых экономических затратах автономные энергосистемы в значительной степени зависят от систем накопления энергии (СНЭ). В настоящее время СНЭ предоставляют многообещающую возможность смягчить проблемы, связанные колебаниями мощности и качеством электроэнергии в автономных энергорайонах [1].

Самыми распространенными накопителями электроэнергии (НЭ) сейчас являются литий-ионные или свинцово-кислотные аккумуляторные батареи (АБ). АБ имеют высокую плотность энергии, но низкую плотность мощности, из-за чего обеспечивается низкая скорость заряда и разряда НЭ [1].

Суперконденсаторы (СК) накапливают энергию посредством статического заряда. По сравнению с АБ СК обладают высокой плотностью мощности, обеспечивая высокую скорость заряда и разряда, однако не способны выдавать мощность длительное время из-за низкой плотности энергии [1].

Для определенных нагрузок, например, для двигателей, требуется высокий пусковой ток. Высокая потребность в токе должна удовлетворяться всего в течение нескольких секунд. Установка АБ высокой доступной мощности в этом случае может оказаться дорогостоящим. В автономных энергосистемах АБ заменяются обычно каждые 3-5 лет. Идеальная СНЭ в автономной энергосистеме должна обеспечивать выдачу большой мощности в короткий срок при внезапных изменениях погоды и условий нагрузки. Таким образом, при использовании гибридной системы накопления энергии (ГСНЭ) на АБ и СК могут быть достигнуты следующие преимущества [1]:

- увеличение срока службы АБ;
- уменьшение размера АБ и, следовательно, стоимости;
- снижение нагрузки на АБ;
- сохранение баланса мощности между выработкой электроэнергии и потребностью потребителей.

В данной статье рассматриваются различные способы подключения СНЭ к сети и способы управления ими.

Характеристика зарядки и разрядки НЭ существенно отличаются в зависимости от их способа подключения к сети. Топология соединений

---

ГСНЭ между собой определяет гибкость управления, динамические характеристики, эффективность и срок службы НЭ. НЭ могут быть подключены к системе напрямую или через силовые преобразователи. Топологию преобразования мощности можно разделить на 3 категории: пассивную, полуактивную и активную.

В пассивной топологии (рис. 1) НЭ подключают к шине постоянного тока без использования каких-либо промежуточных силовых электронных преобразователей. НЭ в пассивной топологии могут обеспечивать пульсирующую нагрузку с более высокой пиковой мощностью и меньшими потерями [2]. Срок службы гибридной комбинации литий-ионных АБ и СК в случае частых циклов заряда и разряда больше, чем при подключении одиночной АБ. Также в ГСНЭ ниже падение напряжения. Связано это с тем, что АБ имеет более высокое внутреннее сопротивление и основной ток проходит через СК. Ограничения в использовании пассивной топологии связаны ограниченным диапазоном рабочего напряжения АБ по причине невозможности влияния на перераспределение мощностей и достижении высокого КПД при низких температурах [3].

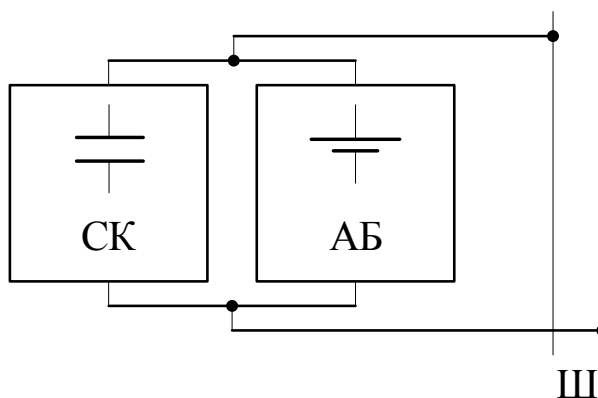


Рис. 1. - Пассивная топология

Преимуществами пассивной топологии являются эффективность, простота и экономичность, обуславливаемые отсутствием силовой электроники, а также требуемое малое пространство. Из недостатков

выделяют невозможность управления перераспределением мощности между НЭ. Большая часть напряжения определяется внутренним сопротивлением, которое зависит от температуры и мгновенного состояния заряда, и характеристиками тока из-за неравномерности напряжения на клеммах. Также топология поддерживает малое количество стратегий управления [4, 5].

В полуактивной топологии (рис. 2) преобразователь постоянного тока подключен к одному из НЭ, в то время как другой НЭ имеет прямое соединение с шиной постоянного тока. В этой топологии выходная мощность одного НЭ контролироваться не может, что обеспечивает ограниченную управляемость. Применение преобразователя требует дополнительного пространства и затрат, но имеет улучшенные возможности в управлении энергией [4, 5].

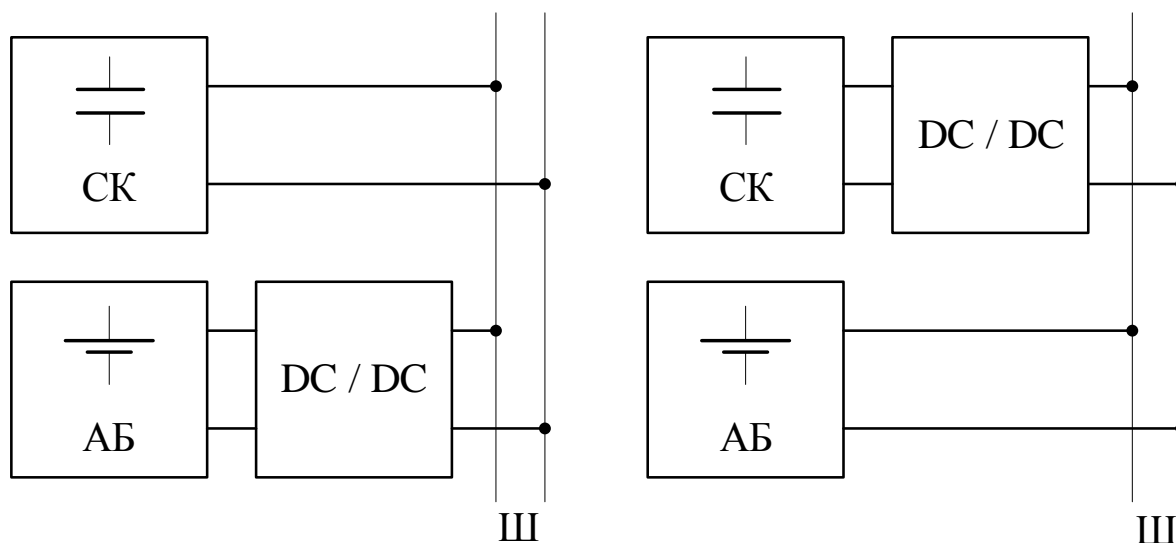


Рис. 2. - Полуактивная топология

Преобразователь постоянного тока может быть подключен как к АБ, так и к СК. Его подключение к СК дает возможность для СК работать в более широком диапазоне напряжений, что повышает его эффективность. Однако при такой настройке АБ подвергается воздействию колеблющегося высокого тока, что отрицательно сказывается на ее сроке службы. Емкость СК должна

быть сравнительно большой для поддержания стабильного напряжения на шине постоянного тока, что приводит к увеличению затрат [4, 5].

Если преобразователь подключить к АБ, то она становится невосприимчивой к кратковременным пикам мощности. Доступная емкость АБ может быть полностью использована в пределах допустимого диапазона рабочего напряжения и мощности [3].

В активной топологии можно использовать более двух накопителей. Каждый блок, взаимодействующий с системой, имеет индивидуальное управление двунаправленным преобразователем мощности. Выделяют схему подключения параллельную и каскадную [4, 5].

В каскадной системе (рис. 3) преобразователь, отделяющий АБ, обычно управляется по току, чтобы обеспечить плавную передачу энергии от АБ. Механизм помогает АБ избежать быстрого процесса зарядки-разрядки, что продлевает ее срок службы. Также необходимо, чтобы преобразователь был рассчитан на общую номинальную мощность ГСНЭ.

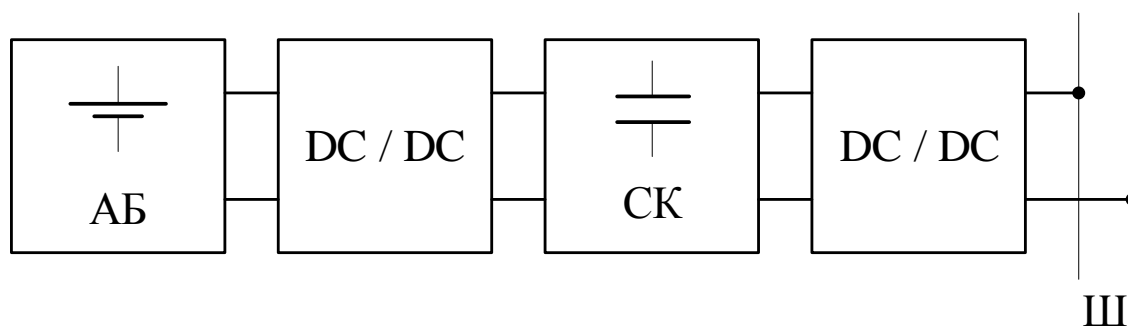


Рис. 3. - Каскадное соединение активной топологии

Параллельное соединение (рис. 4) наиболее предпочтительно, так как НЭ можно управлять по отдельности, и можно использовать широкий спектр стратегий контроля. Также уровни напряжения НЭ не зависят от напряжения в системе и НЭ безболезненно реагируют на отказы в системе.

Активная топология имеет более высокую сложность, стоимость и системные потери, однако наилучший процесс управления и гибкости. Также

из недостатков выделяют потери мощности в силовом преобразователе, что снижает общий КПД ГСНЭ [4, 5].

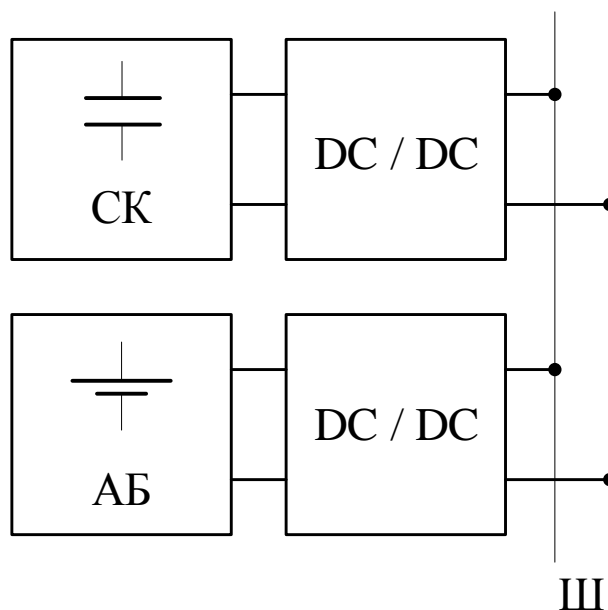


Рис. 4. - Параллельное соединение в активной топологии

Согласно одному из основных технологических направлений интеллектуальной энергетической системы России и перспективным технологиям ВИЭ, одними из основных задач являются разработка и внедрение усовершенствованных методов управления. К таким системам управления предъявляются высокие требования в вопросах качества электроэнергии, унифицированности, возможности расширения их функциональных возможностей вплоть до самостоятельного принятия решений, обучаемости и простоты использования [6].

Реализация контроллера выбирается в зависимости от преимущественных критериев: увеличение срока службы АБ, снижение перебоев в подаче электроэнергии, повышение качества электроэнергии, минимальное время отклика контроллера, стоимость контроллера [7].

Стратегия управления подразделяется на классическую и интеллектуальную (рис. 5).



Рис. 5. - Классификация стратегий управления

Классические стратегии управления:

Управление на основе фильтрации. Передача мощности между накопителями в этом случае может быть на высокой частоте и на низкой. Высокая частота является результатом сбоев в работе фотоэлектрических систем или резких изменений нагрузки. В этом случае необходимы накопители с быстрым временем отклика. Низкая частота – результат регулярного силового воздействия, требующие накопителя с высокой плотностью энергии. Управление разделяет потребляемую мощность на низкочастотную и высокочастотную составляющие с помощью фильтра, что приводит к сглаживанию колебаний тока батареи [7].

Ниже приведена блок схема управления на основе фильтрации (рис. 6). Среднее напряжение  $U_0$  сравнивается с эталонным  $U_э$  и пропускается через пропорционально-интегральный (ПИ) контроллер. Контроллер выдает общий ток  $I_{общ\_э}$ , который должен выдаваться от СНЭ. Общий ток  $I_{общ\_э}$  разделяется на среднюю составляющую мощности и динамическую с использованием фильтра нижних частот. Средняя составляющая мощности приведена в качестве эталона  $I_{АБ\_э}$  для контура управления током АБ, в то время как динамическая составляющая мощности  $I_{ВЧ}$  использует опорное значение тока  $I_{СК\_э}$  для контура управления током СК. Низкочастотная составляющая тока

$I_{HЧ}$  передается ограничителю скорости для управления скоростью заряда /разряда тока АБ, который выдает заданный опорный ток для АБ  $I_{АБ\_э}$ . Ток  $I_{АБ\_э}$  сравнивается с фактическим током батареи  $I_{АБ}$  и ошибка  $I_{АБ\_ош}$  передается на ПИ-контроллер. ПИ-контроллер определяет коэффициент полезного действия (КПД)  $\eta_{АБ}$ , который передается генератору широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для генерации импульсов переключения, соответствующих переключателям на АБ. Из-за медленной динамики АБ может не отслеживать  $I_{АБ\_э}$  мгновенно. Следовательно, возникнет некомпенсированная мощность АБ, которая должна быть компенсирована СК. Опорный ток  $I_{СК\_э}$  сравнивается с фактическим током СК  $I_{СК}$  и ошибка передается на ПИ-контроллер. ПИ-контроллер генерирует КПД  $\eta_{СК}$ , который передается генератору ШИМ для генерации импульсов переключения на СК.

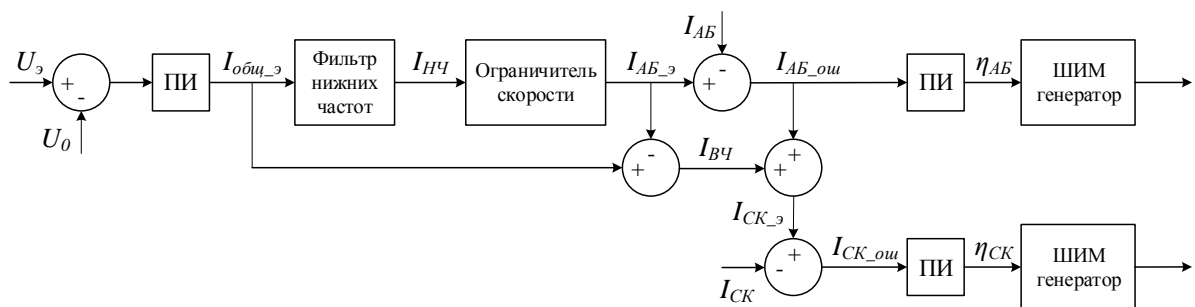


Рис. 6. – Блок-схема управления на основе фильтрации

Из преимуществ схемы можно выделить, что она проста в реализации, требует меньше вычислений по сравнению с модельным контроллером прогнозирования, имеет более быстрое регулирование напряжения, обеспечивает низкие значения тока заряда и разряда АБ, снижает уровень текущей нагрузки на АБ, что увеличивает срок ее службы [8]. Управление может быть реализовано в режиме реального времени, однако оно требует точной математической модели рассматриваемой системы [7].

Управление на базе нечеткой логики. Это управление основано на последовательном принятии решений, основанных на текущих и предыдущих значениях. Алгоритмы определяются математическими



моделями или данными системы. В этом случае большая энергия накопителя ограничивается зарядом.

На рис. 7 приведены пороговые значения мощности АБ  $P_{AB1}$  и  $P_{AB2}$ . При превышении мощности нагрузки, мощность перераспределяется с помощью коэффициента  $K_1$  и  $K_2$  между АБ и СК. Когда мощность нагрузки находится в пределах  $P_{AB1}$  и  $P_{AB2}$ , СК не нужен [7, 9].

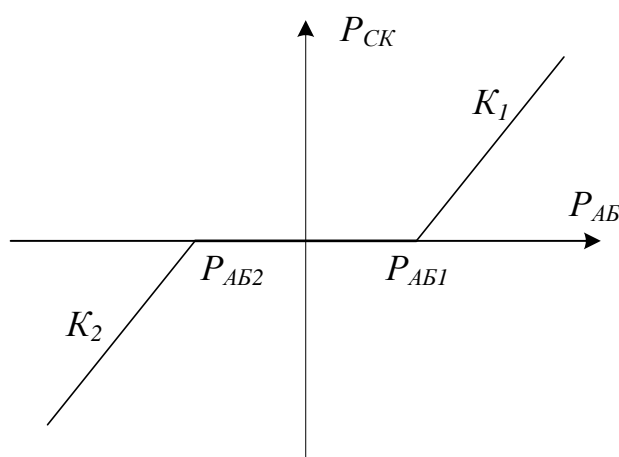


Рис. 7. - Управление на базе нечеткой логики

Этот метод нашел широкое распространение из-за невысокой вычислительной нагрузки и простоты реализации, однако имеет жесткий характер (т.е. не подходит для управления в режиме реального времени), поскольку включает в себя пороговые значения, команды и операции, которые определяются заранее. Также метод очень чувствителен к изменению параметров. При изменении числа СНЭ уменьшается точность управления [7].

Контроль безотказности. Управление работает на основе модели системы, определяющей соотношение рабочих циклов, для минимизации неисправностей в одном цикле поддержанием распределения мощностей между НЭ.

На рис. 8 приведена схема управления, где  $U_{ш\_жел}$  и  $U_{ш}$  – желаемое и фактическое напряжение на шине постоянного тока соответственно,  $U_{AB}$  и

$U_{СК}$  – фактические напряжения на АБ и СК,  $i_{ГСНЭ}$  - фактическое значение тока ГСНЭ,  $i_{АБ}$  и  $i_{СК}$  - фактические значения токов на АБ и СК,  $i_{ГСНЭ\_жел}$  - желаемое значение тока ГСНЭ, которое разделено между АБ и СК в соответствии с их характеристиками,  $i_{АБ\_жел}$  и  $i_{СК\_жел}$  – желаемые значения токов на АБ и СК,  $\eta_{АБ}$  и  $\eta_{СК}$  - коэффициенты полезного действия (КПД) управляющих сигналов. Поскольку КПД АБ и СК рассчитываются в течение одного цикла в режиме реального времени, ГСНЭ может быстро реагировать на помехи от нагрузки и источников ВИЭ и поддерживать напряжение на шине постоянного тока.

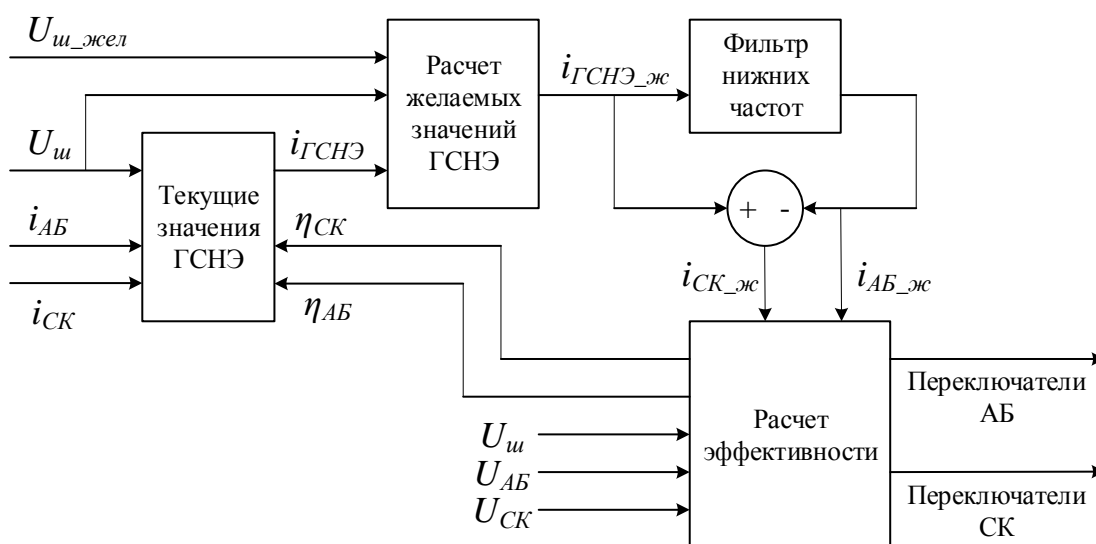


Рис. 8. – Контроль безотказности

Предлагаемый метод обладает преимуществами быстрого динамического отклика, простоты и высокой точности управления. Оптимальные КПД АБ и СК формируются за один цикл управления. Таким образом, СК можно управлять для быстрого реагирования на переходные требования к мощности, а АБ можно регулировать для компенсации средней мощности в соответствии с их характеристиками. С помощью этого метода можно снизить нагрузку на АБ для увеличения срока службы и поддерживать напряжение на шине в пределах заданного значения. Кроме того, исключения дополнительных датчиков тока по сравнению с подходами управления на основе других моделей снижает общие затраты. Недостатком является, что

метод требует точной модели системы, поскольку очень чувствителен к изменению параметров регулятора [7, 10].

Контроль снижения импеданса. Позволяет регулировать распределение высокочастотной и низкочастотной мощности на НЭ. При комбинации емкости и сопротивления НЭ можно управлять перетоком мощности на постоянном токе. Для сокращения количества каналов связи измеряются только напряжения шин аккумуляторных узлов. Преимущество метода состоит в обеспечении стабильной работы системы, в регулировании напряжения на шине и динамическом распределении тока. Управление этой стратегией децентрализовано и очень надежно. Недостатками являются долгий отклик и низкая точность распределения мощностей между НЭ [7, 11].

Управление скользящим режимом. Метод широко применяется при проектировании преобразователя постоянного тока из-за его нелинейности, стабильности, надежности и быстрой динамики. Контроллер реализован с использованием несущих сигналов с ШИМ переменной амплитуды, которые генерируются измерением напряжения выходного конденсатора и тока катушки индуктивности, что позволяет работать без измерений тока выходного конденсатора. Опорные токи индуктора, подключенного к АБ, для контроллера управления скользящим режимом генерируются контроллером энергии СК, который отвечает за распределение мощности по СНЭ. Из преимуществ можно отметить высокую надежность метода, нечувствительность к изменениям параметров, возможность минимизации рассеиваемой мощности и простоту реализации. Управление обеспечивает наилучшее отслеживание выходных данных, но включает в себя сложные процедуры проектирования [5, 7, 12].

Поскольку классические стратегии управления имеют ограничения, были разработаны интеллектуальные методы управления для реализации

---

управления энергопотреблением в ГСНЭ, повышающие эффективность управления. Однако время, необходимое для расчетов в каждом цикле, выше, чем в классических методах, и стоимость системы требует больших затрат [7].

Интеллектуальные методы управления [7]:

Модельный контроллер прогнозирования. Модель предсказывает влияние будущих управляющих решений и изменения в состоянии выработки электроэнергии, что позволяет своевременно принимать необходимые решения, минимизируя отказы в системе. Управление может быть оптимизировано через регулярные промежутки времени, а также может управлять крупномасштабными системами с большим количеством управляющих переменных, но без точной модели системы контроллер не будет работать. Метод содержит высокую вычислительную нагрузку.

Нейронная сеть. Архитектура состоит из трех уровней: входного, скрытого и выходного. Система идеально подходит для управления благодаря своим нелинейным и адаптивным механизмам, способностям к обобщению и независимости проектирования в отношении системных параметров, но для ее обучения требуется большой объем статистических данных. При увеличении числа переменных система требует усложненные алгоритмы, однако она сможет решать такие задачи, как анализ заряда каждого накопителя в режиме реального времени и производство команды на зарядку/разрядку для обеспечения безопасности и продления срока службы накопителя за счет снижения пиковой нагрузки. Контроллер имеет очень сложную конструкцию, использует большое количество вычислений, также труднореализуемо управление в реальном времени.

Оптимизационные методы. Здесь разрабатываются алгоритмы в зависимости от целей управления и объединяются с другими методами, например, с управлением на основе фильтрации. Метод может быть

---

использован для одновременной оптимизации нескольких целевых функций. Для получения оптимального решения требуется время из-за выбора параметров из случайных значений, при этом может не обеспечиваться ожидаемая точность.

Унифицированный контроллер. Контроллер обладает рядом функций таких, как ускоренное динамическое регулирование напряжения, эффективное распределение мощности при любых помехах, уменьшение колебания скорости заряда/разряда АБ и повышение качества электроэнергии. Имеет сложную конструкцию и требует большого количества вычислений в каждый период переключения.

Интеллектуальные методы управления относятся к более сложным методам контроля и дорогостоящим, однако их применение сделает управление ВИЭ более доступным, и тем самым упростит внедрение интеллектуальной сети Smart Grid, позволяющей осуществлять мониторинг и управление сетью в реальном времени, а также коммуникации между потребителями и поставщиками, оптимизируя потребление, сокращая стоимость электроэнергии, и тем самым обеспечивая новый уровень надежности и экономичности энергоснабжения [13].

Таким образом, механизмы управления электропотреблением ГСНЭ необходимы для снижения эксплуатационных расходов, увеличения срока службы оборудования и удовлетворения спроса на электроэнергию. Механизмы управления можно классифицировать в зависимости от предпочтительных факторов принятия решений. Механизмы, учитывающие и экономические, и технические факторы, оптимизируют срок службы, стоимость и производительность накопителя, но нуждаются в сложных алгоритмах оптимизации. Механизмы, учитывающие только экономические факторы, оптимизируют стоимость и размеры накопителя, но не оптимизируют срок службы, также требуют сложных алгоритмов

---

оптимизации. Механизмы, учитывающие только технические факторы, оптимизируют срок службы и производительность, но не оптимизируют стоимость, требуют алгоритмов средней сложности. Механизмы по удовлетворению спроса на электроэнергию требуют алгоритмов простой сложности, но они не оптимизируют срок службы, стоимость и производительность НЭ [14].

Для систем с малой мощностью, где стоимость является решающим фактором, подойдет пассивная топология соединений НЭ с классическими методами контроля. При установке АБ с большими мощностями требуется уделять внимание продлению ее срока службы. В этом случае рекомендуется применять полуактивную или активную топологию соединений НЭ. Можно использовать как классические, так интеллектуальные стратегии управления.

### Литература

1. Kollimalla S.K., Mishra M.K., Narasamma N.L. Design and Analysis of Novel Control Strategy for Battery and Supercapacitor Storage System // Transactions on Sustainable Energy, 2014. vol. 5, no. 4, pp. 1137-1144.
2. Zheng J.P., Jow T.R., Ding M.S. Hybrid power sources for pulsed current applications // Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 37, 2001. no. 1, pp. 288-292.
3. Zimmermann T., Keil P., Hofmann M., Horsche M.F., Pichlmaier S., Jossen A. Review of system topologies for hybrid electrical energy storage systems // Energy Storage, 2016. vol. 8, p. 7890.
4. Roy P., He J., Zhao T., Singh Y.V. Recent Advances of Wind-Solar Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review // Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2022. vol. 3, pp. 81-104.
5. Babu T.S., Vasudevan K.R., Ramachandaramurthy V.K., Sani S.B., Chemud S., Lajim R.M. A Comprehensive Review of Hybrid Energy Storage

Systems: Converter Topologies, Control Strategies and Future Prospects // Access, 2020. vol. 8, pp. 148702-148721.

6. Колосов Р.В., Титов В.В., Титов В.Г. Особенности сопряжения возобновляемых источников (ВИЭ) в контексте развития интеллектуальной энергетической системы России // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1922.

7. Sutikno T., Arsadiando W., Wangsupphaphol A., Yudhana A., Facta M. A Review of Recent Advances on Hybrid Energy Storage System for Solar Photovoltaics Power Generation // Access, 2022. vol. 10, pp. 42346-42364.

8. Kollimalla S.K., Mishra M.K., Narasamma N.L. Design and Analysis of Novel Control Strategy for Battery and Supercapacitor Storage System // Transactions on Sustainable Energy, 2014.vol. 5, no. 4, pp. 1137-1144.

9. Chong L.W., Wong Y.W., Rajkumar R.K., Isa D. Modelling and simulation of standalone PV systems with battery-supercapacitor hybrid energy storage system for a rural household // Energy Proc., 2017. vol. 107, pp. 232-236.

10. Wang B., Manandhar U., Zhang X., Gooi H.B., Ukil A. Deadbeat Control for Hybrid Energy Storage Systems in DC Microgrids // Transactions on Sustainable Energy, 2019. vol. 10, no. 4, pp. 1867-1877.

11. Shi M., Chen X., Zhou J., Chen Y., Wen J., He H. Advanced Secondary Voltage Recovery Control for Multiple HESSs in a Droop-Controlled DC Microgrid // Transactions on Smart Grid, 2019. vol. 10, no. 4, pp. 3828-3839.

12. Wickramasinghe Abeywardana D.B., Hredzak B., Agelidis V.G. A Fixed-Frequency Sliding Mode Controller for a Boost-Inverter-Based Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System // Transactions on Power Electronics, 2017. vol. 32, no. 1, pp. 668-680.

13. Гаглоева И.Э., Добаев А.З., Дедегкаева А.А. Разработка математической модели комплексной оценки состояния

электроэнергетических объектов // Инженерный вестник Дона, 2012, №2. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/775.

14. Colak A., Ahmed K. A Brief Review on Capacity Sizing, Control and Energy Management in Hybrid Renewable Energy Systems // 2021 10th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), Istanbul, Turkey, 2021, pp. 453-458.

### References

1. Kollimalla S.K., Mishra M.K., Narasamma N.L. Transactions on Sustainable Energy, 2014. vol. 5, no. 4, pp. 1137-1144.
2. Zheng J.P., Jow T.R., Ding M.S. Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001. no. 1, pp. 288-292.
3. Zimmermann T., Keil P., Hofmann M., Horsche M.F., Pichlmaier S., Jossen A. Energy Storage, 2016. vol. 8, p. 7890.
4. Roy P., He J., Zhao T., Singh Y.V. Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2022. vol. 3, pp. 81-104.
5. Babu T.S., Vasudevan K.R., Ramachandaramurthy V.K., Sani S.B., Chemud S., Lajim R.M. Access, vol. 8, pp. 148702-148721.
6. Kolosov R.V., Titov V.V., Titov V.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1922.
7. Sutikno T., Arsadiando W., Wangsupphaphol A., Yudhana A., Facta M. Access, vol. 10, pp. 42346-42364.
8. Kollimalla S.K., Mishra M.K., Narasamma N.L. Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, no. 4, pp. 1137-1144.
9. Chong L.W., Wong Y.W., Rajkumar R.K., Isa D. Energy Proc., vol. 107, pp. 232-236.
10. Wang B., Manandhar U., Zhang X., Gooi H.B., Ukil A. Transactions on Sustainable Energy, vol. 10, no. 4, pp. 1867-1877.





11. Shi M., Chen X., Zhou J., Chen Y., Wen J., He H. Transactions on Smart Grid, 2019. vol. 10, no. 4, pp. 3828-3839.
12. Wickramasinghe Abeywardana D.B., Hredzak B., Agelidis V.G. Transactions on Power Electronics, 2017. vol. 32, no. 1, pp. 668-680.
13. Gagloeva I.Je., Dobaev A.Z., Dedegkaeva A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/775](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/775).
14. Colak A., Ahmed K. 2021 10th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), Istanbul, Turkey, 2021, pp. 453-458.

**Дата поступления: 22.11.2023**

**Дата публикации: 6.01.2024**