

Лекция 12. НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЛИНИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА (HVDC). ТЕХНОЛОГИИ FACTS (ГИБКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА).

1. Обзор традиционных технологий передачи электроэнергии и их ограничений
2. Высоковольтные линии постоянного тока (HVDC)
3. Актуальность и необходимость улучшения систем передачи электроэнергии
4. Высоковольтные линии постоянного тока (HVDC)
5. Технологии FACTS (Flexible AC Transmission Systems - Гибкие системы передачи переменного тока)
6. Зеленые технологии в передаче электроэнергии
6. Инновационные технологии передачи электроэнергии

12.1. Обзор традиционных технологий передачи электроэнергии и их ограничений

1. Традиционные системы передачи электроэнергии

1.1. Высоковольтные линии переменного тока (АС)

Традиционные системы передачи электроэнергии на переменном токе (АС) являются основой электросетевой инфраструктуры в большинстве стран. Эти системы используют переменный ток, который меняет направление и величину на регулярной основе (обычно 50 или 60 Гц, в зависимости от региона).

Основные элементы АС систем:

- **Трансформаторы** выполняют функции повышения и понижения напряжения для оптимизации передачи и распределения электроэнергии.

Они используют принцип электромагнитной индукции для изменения уровня напряжения и токов.

- **Линии передачи**, выполненные из проводников, таких как алюминий или медь, проводят электрический ток от генераторов до подстанций и далее к потребителям. Линии могут быть воздушными или кабельными.

- **Подстанции** включают в себя оборудование для преобразования напряжения, распределения электроэнергии, управления потоками энергии, а также защиту сети от коротких замыканий и перегрузок.

Ограничения традиционных АС систем:

- **Потери энергии на линии передачи.** В АС системах потери энергии на линии передачи выражаются в виде тепла, которое теряется из-за сопротивления проводников (потери пропорциональны квадрату тока по формуле $P = I^2R$). Это становится особенно значительным на больших расстояниях.

- **Эффект реактивной мощности.** Реактивная мощность (измеряемая в VAR) возникает из-за наличия индуктивных и ёмкостных элементов в сети. Она не несет полезной работы, но требует дополнительных ресурсов для компенсации. Это приводит к увеличению общей нагрузки на систему и снижению ее эффективности.

- **Ограниченная передача на большие расстояния.** С увеличением расстояния между генератором и потребителем возникают дополнительные потери и необходимость в дополнительных трансформаторах и компенсаторах. Это требует сложного и дорогого оборудования.

- **Сложности синхронизации и стабильности.** АС системы требуют строгой синхронизации частоты и фазы тока для поддержания стабильности работы сети. Небольшие отклонения могут приводить к

серьезным проблемам, таким как колебания напряжения и частоты, что требует сложной системы управления.

- **Интеграция возобновляемых источников энергии.**

Традиционные АС сети могут испытывать трудности при интеграции распределенных возобновляемых источников энергии, таких как солнечные и ветровые установки. Эти источники имеют переменную мощность и требуют дополнительного оборудования для стабилизации сети.

- **Ограниченные возможности межсистемной связи.**

АС сети имеют ограниченные возможности для эффективной передачи энергии между различными регионами или странами из-за проблем с синхронизацией и координацией.

- **Емкостные и индуктивные потери.**

В АС системах линии передачи создают индуктивные и емкостные потери, которые могут повлиять на стабильность и эффективность системы. Это связано с тем, что переменный ток создает переменные магнитные поля и изменяющиеся электрические поля вдоль линии передачи.

- **Эффект линии передачи.**

Длинные линии передачи в АС системах могут действовать как резонатор, создавая определенные частоты, которые могут вызывать колебания напряжения и тока. Это требует дополнительного контроля и компенсации.

- **Регулирование напряжения.**

Использование систем регулирования напряжения, таких как трансформаторы с подстройкой по напряжению (On-Load Tap Changers), для поддержания стабильности и улучшения качества электроэнергии.

- **Сложности с координацией защитных систем.**

Координация защиты в АС системах может быть сложной из-за наличия различных уровней напряжения и типов оборудования, что требует тщательного проектирования и настройки.

12.2. Высоковольтные линии постоянного тока (HVDC)

Высоковольтные линии постоянного тока (HVDC) представляют собой технологию, позволяющую передавать электрическую энергию в виде постоянного тока на большие расстояния. Эта технология применима как для межконтинентальных, так и для межрегиональных сетей. Хотя HVDC не всегда относится к традиционным системам, его использование стало более распространенным в последние десятилетия.

Основные элементы HVDC систем:

- **Преобразователи** (или инверторы) преобразуют переменный ток (AC) в постоянный (DC) на стороне генератора и обратно в AC на стороне потребителя. Они могут быть реализованы с помощью различных технологий, таких как интронные, тиристорные и IGBT преобразователи.

- **Линии передачи**, HVDC линии передачи могут быть воздушными или кабельными и используют проводники с высокими изоляционными свойствами для передачи постоянного тока.

- **Конвертерные станции** обеспечивают преобразование тока и напряжения между AC и DC системами и включают в себя оборудование для управления и защиты сети.

Преимущества HVDC:

- **Высокая эффективность передачи на большие расстояния.** HVDC системы минимизируют потери энергии, так как передача постоянного тока на большие расстояния требует меньшего тока, а, следовательно, меньших потерь на сопротивление (I^2R).

- **Уменьшение потерь энергии.** Потери на линии передачи в HVDC системах меньше, так как постоянный ток не вызывает потерь, связанные с реактивной мощностью.

- **Улучшение надежности и управления потоками энергии.** HVDC системы позволяют более эффективно управлять потоками энергии

и обеспечивают большую надежность сети за счет возможности контроля и регулирования потока энергии.

- **Интеграция с возобновляемыми источниками.** HVDC системы хорошо подходят для интеграции возобновляемых источников энергии, таких как ветровые и солнечные установки, за счет их способности передавать переменную мощность без значительных потерь.

- **Проблемы с ЭМП (Электромагнитное загрязнение).** HVDC системы могут вызывать электромагнитные помехи, которые необходимо учитывать при проектировании систем и инфраструктуры.

- **Кабельные линии HVDC.** Подводные и подземные кабели для HVDC систем могут быть использованы для межконтинентальных или межрегиональных соединений, предоставляя дополнительную гибкость в проектировании и реализации.

- **Капитальные затраты и эксплуатационные расходы.** HVDC системы имеют высокие первоначальные капитальные затраты на оборудование и строительство, но могут предложить долгосрочные преимущества в виде снижения потерь и повышения надежности.

Традиционные системы передачи на переменном токе (AC) и современные технологии на постоянном токе (HVDC) имеют свои особенности и ограничения. AC системы сталкиваются с проблемами потерь энергии, реактивной мощности, сложностей в интеграции возобновляемых источников и межсистемной связи. В свою очередь, HVDC системы предлагают более эффективные решения для передачи электроэнергии на большие расстояния, управления потоками энергии и интеграции возобновляемых источников. В сочетании с передовыми технологиями FACTS и зеленым подходам, HVDC открывает новые возможности для оптимизации и модернизации энергетических систем, способствуя улучшению общей эффективности и надежности.

12.3. Актуальность и необходимость улучшения систем передачи электроэнергии

Современная энергетическая инфраструктура сталкивается с рядом значительных вызовов, требующих актуализации и усовершенствования систем передачи электроэнергии. Эти вызовы обусловлены ростом потребления энергии, изменениями в источниках генерации, необходимостью обеспечения надежности и устойчивости систем, а также экологическими и экономическими требованиями.

1. Рост потребления электроэнергии. Глобальный рост населения и ускоренное развитие технологических и промышленных процессов приводят к значительному увеличению спроса на электроэнергию. По оценкам Международного энергетического агентства (IEA), мировое потребление электроэнергии будет продолжать расти, что требует расширения и модернизации существующей инфраструктуры передачи электроэнергии. В условиях увеличенного потребления становится критически важным обеспечить эффективную и надежную передачу энергии от источников генерации к конечным потребителям.

2. Изменение структуры источников генерации. Современные тенденции в энергетическом секторе характеризуются переходом к возобновляемым источникам энергии, таким как солнечные и ветровые установки. Эти источники энергии обладают переменной и неустойчивой мощностью, что требует новых подходов к передаче и распределению электроэнергии. Интеграция возобновляемых источников в существующие системы требует усовершенствования технологий передачи, чтобы справляться с изменениями в производстве и обеспечить стабильность энергоснабжения.

3. Надежность и устойчивость систем. Энергетические сети сталкиваются с необходимостью повышения надежности и устойчивости к различным видам нарушений, включая физические повреждения,

природные катастрофы и техногенные аварии. Необходимость повышения устойчивости к аварийным ситуациям и сбоям в системе требует модернизации систем защиты, внедрения современных технологий мониторинга и управления, а также обеспечения эффективного восстановления после нарушений.

4. Энергетическая эффективность и снижение потерь. Одна из ключевых задач, стоящих перед современными системами передачи электроэнергии, заключается в снижении потерь энергии, возникающих на линии передачи. Традиционные системы переменного тока (AC) подвержены значительным потерям энергии из-за сопротивления проводников и реактивной мощности. Высоковольтные системы постоянного тока (HVDC) представляют собой решение, позволяющее существенно снизить потери на длинных дистанциях, что способствует повышению общей энергетической эффективности системы.

5. Экологические требования. Современные экологические требования и международные соглашения по снижению углеродных выбросов стимулируют переход к более чистым и устойчивым технологиям. Устойчивость систем передачи энергии также включает в себя способность минимизировать воздействие на окружающую среду. Зеленые технологии, такие как HVDC и передовые системы управления, способствуют снижению углеродного следа и поддерживают интеграцию возобновляемых источников энергии.

6. Экономические соображения. Эффективность систем передачи электроэнергии имеет прямое влияние на экономические аспекты энергетической отрасли. Высокие затраты на строительство и эксплуатацию сетевой инфраструктуры требуют оптимизации для достижения наилучшего соотношения затрат и пользы. Инвестиции в современные технологии, такие как HVDC и системы FACTS, могут потребовать значительных капитальных затрат, но они обеспечивают

долгосрочные экономические выгоды за счет снижения потерь, повышения надежности и улучшения интеграции возобновляемых источников.

7. Глобальные тренды и технологические инновации

- **Интеграция новых технологий.** Современные системы передачи электроэнергии начинают активно интегрировать новые технологии, такие как Интернет вещей (IoT), искусственный интеллект (AI) и машинное обучение для мониторинга и оптимизации работы сетей. Эти технологии позволяют проводить более точный анализ данных, улучшать управление энергопотоками и предсказывать потенциальные проблемы до их возникновения.

- **Умные сети (Smart Grids).** Умные сети представляют собой модернизированное и цифровизированное решение для управления передачей электроэнергии. Они обеспечивают возможность более гибкого управления энергоснабжением, более точного мониторинга состояния сети и интеграции разнообразных источников энергии, включая возобновляемые. Умные сети также позволяют оптимизировать потребление энергии на уровне потребителей и улучшать взаимодействие между различными элементами энергетической инфраструктуры.

8. Социальные и политические факторы

- **Энергетическая безопасность.** Улучшение систем передачи электроэнергии также связано с вопросами энергетической безопасности. Энергетическая инфраструктура должна быть защищена от потенциальных угроз, таких как кибератаки и физические повреждения, что требует внедрения современных технологий защиты и мониторинга.

- **Политическая воля и регулирование.** Политические решения и государственные политики играют важную роль в модернизации энергетических систем. Поддержка со стороны правительства, разработка и внедрение новых стандартов и норм, а также предоставление субсидий и

финансовой поддержки для инновационных проектов могут способствовать ускорению процесса модернизации систем передачи электроэнергии.

9. Инфраструктурные вызовы

- **Устойчивость к изменениям климата.** Изменения климата оказывают влияние на энергетическую инфраструктуру, вызывая частые и интенсивные экстремальные погодные явления. Современные системы передачи должны быть спроектированы с учетом этих изменений, чтобы выдерживать повышенные нагрузки и минимизировать повреждения от природных катастроф.

- **Старение инфраструктуры.** Во многих странах существует проблема старения энергетической инфраструктуры, которая требует модернизации и замены. Старые линии и оборудование не всегда соответствуют современным требованиям по эффективности и надежности, что делает необходимым их обновление и улучшение.

10. Влияние на рынок и конкуренцию

- **Развитие рынка энергетических услуг.** Современные технологии передачи электроэнергии могут способствовать развитию новых рыночных моделей и услуг, таких как децентрализованные рынки электроэнергии и обмен избыточной энергии между пользователями. Это может привести к увеличению конкуренции и улучшению качества услуг для потребителей.

- **Инвестиционная привлекательность.** Инвестиции в современные технологии передачи электроэнергии могут повысить привлекательность энергетического сектора для частных инвесторов и компаний. Это может способствовать ускорению внедрения инноваций и улучшению качества и надежности энергоснабжения.

Актуальность и необходимость улучшения систем передачи электроэнергии обусловлены целым рядом факторов, включая рост

потребления, изменение структуры генерации, требования к надежности и устойчивости, экологические и экономические аспекты. Современные технологии, такие как HVDC и FACTS, предоставляют эффективные решения для повышения эффективности и устойчивости энергетических систем, что является критически важным для обеспечения надежного и устойчивого энергоснабжения в будущем.

12.4. Высоковольтные линии постоянного тока (HVDC)

Опишем подробнее основы HVDC

Принципы работы HVDC:

- **Преобразование тока.** HVDC системы основаны на преобразовании переменного тока (AC) в постоянный ток (DC) с помощью преобразователей. Эти устройства могут использовать тиристоры (в системах Line Commutated Converter, LCC) или транзисторы (в системах Voltage Source Converter, VSC). Преобразователи обеспечивают управление процессом преобразования и поддерживают стабильность и надежность системы.

- **Передача энергии.** После преобразования, энергия передается по линиям HVDC, которые могут быть воздушными или подземными. Передача постоянного тока позволяет значительно снизить потери на большие расстояния и обеспечивает более стабильный контроль над потоками энергии.

- **Обратное преобразование.** На приемной стороне линии HVDC, постоянный ток преобразуется обратно в переменный для интеграции с существующей AC сетью. Это осуществляется с помощью преобразовательных устройств, которые могут быть аналогичны тем, что используются на стороне передачи.

- **Контроль и управление.** HVDC системы включают устройства для мониторинга и регулирования напряжения, мощности и частоты. Эти устройства позволяют эффективно управлять энергопотоками и

поддерживать устойчивость системы в условиях переменной нагрузки и генерации.

Сравнение с традиционными АС системами:

1. Потери энергии:

- **АС системы.** Потери на передачу переменного тока обусловлены сопротивлением проводников, реактивной мощностью и необходимостью компенсации реактивной мощности. Эти потери увеличиваются с расстоянием передачи и могут достигать значительных величин при больших расстояниях.

- **HVDC системы.** Потери на передачу постоянного тока значительно ниже, особенно на длинных дистанциях. Отсутствие реактивной мощности и меньшая потеря в проводниках делают HVDC более эффективным для межрегиональных и межконтинентальных соединений.

2. Стабильность и интеграция:

- **АС системы.** Системы переменного тока подвержены влиянию реактивной мощности, что может привести к колебаниям напряжения и снижению надежности. Для обеспечения стабильности и синхронизации требуются сложные системы регулирования и управления.

- **HVDC системы.** HVDC обеспечивает лучшую стабильность и управление потоками энергии. Он позволяет передавать энергию между системами с разной частотой и фазой, а также поддерживает более высокую надежность и гибкость в управлении.

3. Инфраструктурные требования:

- **АС системы.** Требуют значительных затрат на оборудование для регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности, включая трансформаторы, конденсаторные банки и индуктивные реакторы.

- **HVDC системы.** Меньше зависят от таких компонентов, так как передача постоянного тока требует меньшего количества компенсационных устройств и упрощает управление.

Преимущества HVDC

Высокая эффективность передачи на большие расстояния. HVDC системы обеспечивают значительно меньшие потери при передаче энергии на большие расстояния. Это связано с тем, что постоянный ток не имеет реактивных потерь, и сопротивление проводников оказывает меньшее влияние на общие потери. Это делает HVDC идеальным для межрегиональных и межконтинентальных линий.

Уменьшение потерь энергии. Системы HVDC могут снижать потери энергии за счет меньшего сопротивления и отсутствия потерь на реактивную мощность. Это позволяет существенно повысить общую эффективность передачи электроэнергии и сократить затраты на строительство и эксплуатацию сетевой инфраструктуры.

Улучшение надежности и управления потоками энергии. HVDC системы предлагают улучшенное управление энергопотоками и большую гибкость в интеграции различных источников энергии. Они способны быстро реагировать на изменения в нагрузке и генерации, что обеспечивает более высокую стабильность и надежность системы. Управление активной и реактивной мощностью возможно независимо, что упрощает интеграцию возобновляемых источников.

Таблица 12.1

Типы HVDC систем

Тип системы HVDC	Принцип работы	Преимущества	Недостатки
Line Commutated Converter (LCC)	Использует тиристоры для фазового управления преобразованием тока	Высокая эффективность, надежность, подходит для больших мощностей	Требует синхронизации с АС сетью, сложные системы защиты

Voltage Source Converter (VSC)	Использует IGBT для управления постоянным током	Гибкость, независимое управление активной и реактивной мощностью, подходит для слабых или изолированных сетей	Более дорогие устройства, меньшая эффективность при больших мощностях
--------------------------------	---	---	---

Типы HVDC систем. HVDC с системой цепного преобразования (Line Commutated Converter, LCC):

- **Принцип работы.** Системы LCC используют тиристоры для преобразования переменного тока в постоянный. Эти преобразователи работают по принципу фазового управления и синхронизируются с АС сетью. LCC системы обеспечивают высокую эффективность передачи и могут передавать большие мощности на большие расстояния.

- **Преимущества и недостатки.** LCC системы имеют высокую эффективность и надежность, но их работа требует синхронизации с АС сетью и может быть ограничена в управлении реактивной мощностью. Эти системы также чувствительны к изменению в напряжении и могут требовать сложных систем защиты.

HVDC с системой с возможностью передачи через несколько соединений (Voltage Source Converter, VSC):

- **Принцип работы.** VSC системы используют IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) для преобразования и управления постоянным током. Эти системы могут работать независимо от АС сети, что позволяет их использовать в слабых или изолированных сетях.

- **Преимущества и недостатки.** VSC системы обеспечивают гибкость в управлении и могут подключаться к сетям с различными характеристиками. Они позволяют регулировать активную и реактивную

мощность независимо, что упрощает интеграцию возобновляемых источников. Однако, VSC системы могут быть дороже и менее эффективны при больших мощностях по сравнению с LCC.

Примеры реализации. Международные и национальные проекты HVDC:

- Проект HVDC в Европе:

- **North Sea Wind Power Hub.** Этот проект представляет собой амбициозную инициативу по созданию сети HVDC, которая объединит несколько стран Северной Европы (Дания, Германия, Нидерланды) для интеграции ветряных установок в Северном море. Проект направлен на эффективное распределение энергии между странами и поддержание стабильности сети.

- **EstLink.** HVDC линия, соединяющая Финляндию и Эстонию, позволяет эффективный обмен электроэнергией между двумя странами и способствует улучшению стабильности и надежности региональной сети.

- Проект HVDC в Китае:

- **Система HVDC Тунган - Наньху.** Один из крупнейших и мощных проектов HVDC в мире, передающий электроэнергию на расстояние более 2000 км от северного Китая к югу. Эта система обеспечивает передачу больших объемов энергии с минимальными потерями и играет ключевую роль в стабилизации китайской энергетической сети.

- **Система HVDC Синьцзянь – Восток.** Крупный проект, интегрирующий электроэнергию от солнечных и ветряных установок в удаленных регионах Китая в национальную сеть. Эта система демонстрирует потенциал HVDC для улучшения связи между удаленными регионами и основными потребительскими центрами.

Эти примеры иллюстрируют разнообразие применения HVDC систем и их значительную роль в модернизации и оптимизации передачи

электроэнергии, обеспечивая высокую эффективность и надежность на больших расстояниях.

Таблица 12.2

Сравнение HVDC и AC систем

Параметр	HVDC (Высоковольтный постоянный ток)	AC (Переменный ток)
Эффективность передачи	Высокая на больших расстояниях, меньше потерь	Меньше на больших расстояниях, значительные потери из-за реактивной мощности
Потери энергии	Меньше из-за отсутствия реактивной мощности	Выше из-за потерь на реактивную мощность и сопротивление проводников
Стабильность сети	Более стабильная, может работать с различными частотами и фазами	Менее стабильна, требует сложного управления и синхронизации
Инфраструктурные требования	Меньше требований к компенсации реактивной мощности	Требуются трансформаторы, конденсаторные банки, индуктивные реакторы
Гибкость управления	Высокая, независимое управление активной и реактивной мощностью	Ограниченная, зависимость от параметров сети и синхронизации
Интеграция возобновляемых источников	Легче интегрировать благодаря гибкости управления	Сложнее из-за необходимости управления реактивной мощностью и синхронизации
Капитальные затраты	Высокие затраты на преобразователи и оборудование	Затраты могут быть ниже, но зависят от сложности сети и управления

12.5. Технологии FACTS (Flexible AC Transmission Systems)

Основы FACTS

Принципы работы гибких систем передачи переменного тока.

Технологии FACTS (Flexible AC Transmission Systems) предназначены для повышения гибкости и динамического управления переменным током в электрических сетях. Эти системы интегрируют полупроводниковые

устройства, которые обеспечивают управление ключевыми параметрами сети, такими как напряжение, реактивная мощность и активная мощность. Основные принципы работы включают:

- **Управление реактивной мощностью.** FACTS устройства способны изменять уровень реактивной мощности в сети, что позволяет поддерживать стабильность напряжения и предотвращать перегрузки. Это достигается за счет включения или отключения конденсаторов и реакторов или за счет использования инверторов.

- **Гибкость управления.** Технологии FACTS позволяют оперативно регулировать параметры сети в реальном времени. Это обеспечивает улучшение стабильности и надежности системы, особенно в условиях переменного спроса и генерации.

- **Интеграция с существующими системами.** FACTS устройства могут быть интегрированы в существующие системы управления сетями, что позволяет использовать их в сочетании с другими методами контроля и защиты.

- **Энергетическая эффективность.** Функциональность FACTS устройств способствует повышению общего уровня энергетической эффективности за счет оптимизации использования существующей инфраструктуры и снижения потерь энергии.

Таблица 12.3

Основы FACTS

Аспект	Описание
Принцип работы	Управление реактивной мощностью и параметрами сети с помощью полупроводниковых устройств.
Гибкость управления	Оперативное регулирование параметров сети в реальном времени для улучшения стабильности и надежности.
Интеграция с системами	Интеграция с существующими системами управления и защиты.
Энергетическая эффективность	Оптимизация использования инфраструктуры и снижение потерь энергии.

Компоненты FACTS. Системы STATCOM (Static Synchronous Compensator):

- **Принцип работы.** STATCOM использует инверторы для генерации или поглощения реактивной мощности. Этот метод позволяет стабилизировать напряжение в сети путем компенсации изменений в реактивной мощности. Инверторы преобразуют постоянный ток в переменный, что обеспечивает точное управление реактивной мощностью.

Компоненты и функции:

- **Инвертор.** Основной компонент, который преобразует постоянный ток в переменный и обеспечивает необходимый уровень реактивной мощности.

- **Схема управления.** Автоматически регулирует выходную реактивную мощность на основе текущих данных о состоянии сети.

- **Конденсаторы и дроссели.** Используются для фильтрации и сглаживания выходного сигнала инвертора.

- **Преимущества.** STATCOM обладает высокой скоростью отклика, что позволяет быстро реагировать на изменения в сети. Компактность устройства делает его удобным для установки в условиях ограниченного пространства.

Системы SVC (Static Var Compensator):

- **Принцип работы.** SVC управляет реактивной мощностью сети с помощью конденсаторов и индуктивных реакторов. Эти элементы могут быть подключены или отключены в зависимости от потребностей сети, что позволяет поддерживать стабильное напряжение и улучшать качество электроснабжения.

1. Компоненты и функции:

- **Конденсаторы и реакторы.** Основные элементы, обеспечивающие компенсацию реактивной мощности.

- **Система управления.** Регулирует включение и отключение конденсаторов и реакторов для поддержания требуемого уровня реактивной мощности.

- **Фильтры.** Используются для уменьшения гармонических искажений, возникающих при изменении состояния элементов SVC.

2. **Преимущества.** SVC устройства эффективны для регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности, однако их реакция может быть медленнее по сравнению с STATCOM.

Системы UPFC (Unified Power Flow Controller):

1. **Принцип работы.** UPFC сочетает в себе функции управления реактивной мощностью и регулирования активной мощности. Это достигается использованием двух основных компонентов: STATCOM и серии компенсационного устройства. UPFC позволяет оптимизировать поток энергии и улучшать общую стабильность сети.

2. Компоненты и функции:

- **STATCOM.** Обеспечивает управление реактивной мощностью.
- **Series Compensation.** Регулирует активную мощность путем изменения параметров подключения в цепи.
- **Система управления.** Интегрирует функции STATCOM и Series Compensation для комплексного управления потоком мощности.

3. **Преимущества.** UPFC позволяет одновременно регулировать активную и реактивную мощность, что обеспечивает высокую степень контроля над энергопотоками и улучшает стабильность сети. Это делает его особенно полезным для сложных сетевых конфигураций и условий с высоким уровнем нагрузки.

Таблица 12.4

Компоненты FACTS

Компонент	Принцип работы	Основные функции	Преимущества
STATCOM	Использует	Поддержание	Высокая

	инверторы для управления реактивной мощностью.	стабильного напряжения, компенсация реактивной мощности.	скорость отклика, компактность.
SVC	Управляет реактивной мощностью с помощью конденсаторов и реакторов.	Регулирование напряжения, компенсация реактивной мощности.	Эффективность для регулирования напряжения, простота установки.
UPFC	Сочетает функции STATCOM и Series Compensation для комплексного управления потоком мощности.	Регулирование как активной, так и реактивной мощности.	Высокий уровень контроля над энергопотоками, улучшение стабильности сети.

Преимущества FACTS.

Улучшение стабильности и надежности систем:

- **Поддержка напряжения.** FACTS устройства помогают поддерживать стабильное напряжение в сети, компенсируя флуктуации и улучшая реакцию на изменения в нагрузке и генерации. Это снижает вероятность перегрузок и сбоев, обеспечивая более надежную работу системы.

- **Повышение пропускной способности.** Оптимизация потоков энергии позволяет использовать существующую инфраструктуру более эффективно, увеличивая ее пропускную способность. Это помогает снизить необходимость в строительстве новых линий и подстанций.

- **Снижение потерь энергии.** Улучшение управления реактивной мощностью и оптимизация потоков энергии позволяют сократить потери энергии в сети, что способствует повышению общей энергетической эффективности и снижению эксплуатационных затрат.

Оптимизация использования существующей инфраструктуры:

- **Увеличение пропускной способности.** За счет гибкого управления параметрами сети, FACTS устройства позволяют увеличить пропускную способность существующих линий и трансформаторов. Это снижает необходимость в дополнительных инвестициях в расширение инфраструктуры.

- **Снижение необходимости в новых построениях.** Эффективное использование текущих ресурсов позволяет отложить или полностью избежать строительства новых линий и подстанций, что приводит к значительным экономическим выгодам.

- **Интеграция возобновляемых источников.** FACTS технологии улучшают интеграцию возобновляемых источников энергии в сеть, обеспечивая надежное управление и распределение энергии. Это способствует более устойчивому и экологически чистому развитию энергетической системы.

Таблица 12.5

Преимущества FACTS

Преимущество	Описание
Улучшение стабильности	Поддержка стабильного напряжения, предотвращение перегрузок и сбоев.
Повышение пропускной способности	Оптимизация существующей инфраструктуры, увеличение пропускной способности.
Снижение потерь энергии	Эффективное управление реактивной мощностью и оптимизация потоков энергии для снижения потерь.
Интеграция возобновляемых источников	Улучшение интеграции возобновляемых источников энергии в сеть.

Примеры применения FACTS

Внедрение в существующих электрических сетях:

1. **Примеры применения STATCOM. Проект в США.** STATCOM системы были установлены в сетях высокой напряженности в Калифорнии для улучшения стабильности напряжения и управления нагрузкой. Эти

устройства помогли эффективно справляться с переменным спросом и интеграцией возобновляемых источников.

2. Примеры применения SVC. Проект в Великобритании. SVC устройства были установлены для управления реактивной мощностью в городской сети, что позволило улучшить стабильность и качество электроснабжения. Эти устройства помогли справиться с колебаниями напряжения и снизить потери энергии.

3. Примеры применения UPFC. Проект в Канаде. UPFC системы были использованы для управления потоками энергии в сложной сети, что позволило эффективно использовать существующую инфраструктуру и улучшить стабильность сети. Это было особенно важно для регионов с высоким уровнем нагрузки и переменным производством.

Эти примеры демонстрируют разнообразные способы применения технологий FACTS в современных электрических сетях, подчеркивая их важность для повышения стабильности, надежности и эффективности систем передачи переменного тока.

Таблица 12.6

Влияние на зеленые технологии

Технология FACTS	Влияние на зеленые технологии
STATCOM	Повышает стабильность сетей с высоким уровнем интеграции возобновляемых источников.
SVC	Снижает потери энергии и улучшает качество электроснабжения, что способствует эффективному использованию возобновляемых источников.
UPFC	Обеспечивает комплексное управление, улучшая интеграцию возобновляемых источников и повышая общую устойчивость сети.

12.6. Зеленые технологии в передаче электроэнергии

Интеграция возобновляемых источников энергии с HVDC и FACTS представляет собой ключевой аспект современного устойчивого

энергетического развития. **HVDC (High-Voltage Direct Current - Высоковольтный постоянный ток)** технологии обеспечивают высокую эффективность передачи электроэнергии на большие расстояния, что особенно важно для связи удаленных источников возобновляемой энергии, таких как ветряные и солнечные фермы, с централизованными потребителями. Эта технология позволяет минимизировать потери энергии, возникающие при передаче переменного тока на дальние расстояния, и стабилизировать поток энергии, компенсируя колебания в производстве. HVDC также позволяет соединять сети с различными частотами и напряжениями, что способствует интеграции возобновляемых источников и повышению гибкости энергосистемы.

С другой стороны, **FACTS (Flexible AC Transmission Systems - Гибкие системы передачи переменного тока)** устройства, такие как STATCOM и SVC, играют важную роль в управлении реактивной мощностью и поддержании стабильного напряжения в сети. Эти технологии помогают компенсировать колебания, вызванные переменными источниками энергии, и оптимизировать распределение электроэнергии. FACTS устройства улучшают качество электроснабжения и сетевую устойчивость, что позволяет более эффективно интегрировать возобновляемые источники и снижать потребность в углеродных источниках энергии.

Современные технологии передачи электроэнергии способствуют снижению углеродного следа и поддержанию устойчивого развития. Интеграция HVDC и FACTS с возобновляемыми источниками энергии позволяет более эффективно использовать экологически чистые ресурсы и минимизировать углеродные выбросы. Технологии HVDC сокращают потери энергии при передаче на большие расстояния, что снижает необходимость в дополнительной генерации. FACTS устройства

улучшают энергетическую эффективность, сокращая потери и потребность в углеродных источниках для компенсации потерь.

Современные подходы к управлению энергией, включая интеллектуальные сети и системы хранения энергии, способствуют более эффективному распределению и использованию энергии. Интеллектуальные сети позволяют интегрировать возобновляемые источники и управлять потоками энергии, что снижает углеродные выбросы и поддерживает устойчивость сетей. Системы хранения энергии, такие как литий-ионные и натрий-ионные батареи, а также технологии на основе водорода, дополняют HVDC и FACTS, увеличивая гибкость и надежность энергетической инфраструктуры.

Примеры реализации зеленых технологий включают проект HVDC «NordLink» в Европе, который соединяет Норвегию и Германию, передавая гидроэлектрическую энергию из Норвегии в Германию, способствуя снижению углеродных выбросов в Германии. Проект HVDC «Pacific DC Intertie» в США передает гидроэлектрическую энергию из Вашингтона в Калифорнию, снижая углеродные выбросы в Калифорнии. В Индии внедрение систем FACTS, таких как STATCOM и SVC, поддерживает интеграцию солнечных и ветровых электростанций, улучшая качество электроснабжения и снижая углеродный след. В Южной Корее применение FACTS технологий в промышленных зонах с высокой долей возобновляемой генерации улучшает качество электроснабжения и поддерживает интеграцию ВИЭ, способствуя снижению углеродного следа.

Влияние на экономику и общество также важно. Внедрение зеленых технологий создает новые рабочие места, стимулирует инвестиции в устойчивые технологии и улучшает качество жизни. Государственная политика и международные соглашения поддерживают развитие этих технологий, способствуя их внедрению и распространению.

Эти примеры показывают, как технологии HVDC и FACTS могут эффективно поддерживать зеленые инициативы, способствуя интеграции возобновляемых источников энергии, снижению углеродных выбросов и улучшению устойчивости энергосистем.

12.7. Инновационные технологии передачи электроэнергии

1. Интеллектуальные сети (Smart Grids) представляют собой модернизированные энергетические сети, которые используют передовые цифровые технологии для мониторинга, управления и оптимизации потоков электроэнергии. Эти технологии улучшают эффективность, надежность и устойчивость энергосистем.

- **Цифровизация и автоматизация.** Интеллектуальные сети применяют датчики, контрольные устройства и программное обеспечение для реального времени мониторинга и управления энергией. Это позволяет осуществлять динамическое управление спросом и предложением, а также оперативное реагирование на аварийные ситуации. Примером является проект Grid4EU в Европе, который внедрил интеллектуальные решения для оптимизации распределения энергии и управления нагрузкой.

- **Интеграция возобновляемых источников.** Smart grids позволяют эффективно интегрировать различные источники возобновляемой энергии, такие как солнечные панели и ветровые турбины, в существующую энергосеть. Это достигается за счет использования современных технологий управления потоками энергии и прогнозирования производства. Примером успешной интеграции является программа SMUD (Sacramento Municipal Utility District) в США, которая внедрила интеллектуальные сети для управления интеграцией солнечной энергии.

- **Управление энергией в реальном времени.** Интеллектуальные сети позволяют реализовать управление энергией в реальном времени, что помогает поддерживать баланс между спросом и предложением. Это

также позволяет пользователям активнее участвовать в управлении своей энергией, например, через системы управления домом.

2. Сверхпроводящие кабели

Сверхпроводящие кабели представляют собой технологию передачи электроэнергии с использованием материалов, которые теряют сопротивление при низких температурах, что позволяет передавать электрическую энергию с минимальными потерями.

- **Материалы и технологии.** Основными материалами для сверхпроводящих кабелей являются высокотемпературные сверхпроводники, такие как оксиды меди и железа, которые обладают способностью проводить ток без сопротивления при температурах ниже 77 К (температура кипения жидкого азота). Примером является проект в городе Нью-Йорк, где применяется сверхпроводящий кабель для улучшения передачи энергии в городской сети.

Сверхпроводящие кабели позволяют существенно увеличить пропускную способность линий передачи, уменьшая размеры проводов и требуемое пространство для инфраструктуры. Это особенно важно в густонаселенных и перегруженных зонах. Примером успешного использования сверхпроводящих кабелей является проект в Париже, где установлены сверхпроводящие кабели для обеспечения надежного и эффективного электроснабжения.

3. Виртуальные электростанции (Virtual Power Plants, VPP)

Виртуальные электростанции представляют собой интегрированные платформы, которые объединяют распределенные источники энергии, такие как солнечные панели, ветровые турбины и системы хранения, в единую управляющую сеть. Они позволяют эффективно управлять ресурсами и обеспечивать надежность энергосистемы.

- **Функциональные возможности.** VPP управляют распределенными энергетическими ресурсами так, как если бы они были

единым источником энергии. Это позволяет оптимизировать использование ресурсов, повышать эффективность и обеспечивать баланс между спросом и предложением. Примером является проект Next Kraftwerke в Германии, который объединяет более 10 000 распределенных энергетических ресурсов в единую виртуальную электростанцию.

- **Экономические и экологические преимущества.** VPP способствуют снижению затрат на энергию, улучшению стабильности и надежности сети, а также поддерживают интеграцию возобновляемых источников. Это приводит к снижению углеродных выбросов и повышению устойчивости энергосистем.

Эти инновационные технологии передовой передачи электроэнергии играют ключевую роль в создании устойчивых и эффективных энергетических систем, способствуя интеграции возобновляемых источников, улучшению качества электроснабжения и снижению углеродных выбросов.

4. Системы передачи энергии на основе лазеров. Системы передачи энергии через лазеры предполагают использование лазерного излучения для передачи энергии на большие расстояния без проводов.

Передача энергии через лазеры позволяет устранить потери на сопротивление проводников и дает гибкость в размещении систем. Примером является проект PowerLight Technologies, который исследует использование лазеров для беспроводной передачи энергии в труднодоступные места.

5. Технологии передачи энергии через магнитные поля (MPT). Технологии передачи энергии через магнитные поля включают использование магнитной индукции для беспроводной передачи энергии.

Эти технологии обеспечивают высокую надежность за счет отсутствия проводников и позволяют передавать энергию в ограниченных

пространствах. Примером применения являются контактные подъемники и системы зарядки беспроводных электрических транспортных средств.

6. Гибридные системы хранения и управления энергией.

Гибридные системы объединяют различные технологии хранения энергии, такие как батареи и суперконденсаторы, для оптимизации управления мощностью и долговечности.

Эти системы обеспечивают лучшую производительность и более эффективное управление пиковыми нагрузками. Примером являются системы Tesla Powerpack и Powerwall, которые интегрируют литий-ионные батареи с другими технологиями для повышения эффективности.

7. Энергетические блокчейн-платформы. Блокчейн-технологии используются для создания децентрализованных платформ, позволяющих участникам торговать электроэнергией и управлять энергией в реальном времени.

Блокчейн обеспечивает прозрачность и безопасность транзакций, а также децентрализацию управления ресурсами. Примером является проект Power Ledger в Австралии, который использует блокчейн для платформы торговли солнечной энергией.

8. Технологии передачи энергии на основе квантовых точек.

Квантовые точки - это наноструктуры, которые могут использоваться для высокоэффективной передачи энергии, используя квантовые эффекты.

Эти технологии позволяют передавать энергию с минимальными потерями и открывают новые возможности в области нанотехнологий и квантовой электроники. Исследования в этой области активно проводятся в университетах и научных лабораториях.

9. Системы беспроводной передачи энергии через резонансное магнитное вызывать. Эти системы используют резонансные магнитные поля для беспроводной передачи энергии между катушками, настроенными на одинаковую частоту.

Позволяют передавать энергию без проводов на небольшие расстояния с высокой эффективностью. Примером является технология Qi для беспроводной зарядки мобильных устройств.

Зеленые технологии играют ключевую роль в современном подходе к передаче электроэнергии, способствуя интеграции возобновляемых источников энергии и снижению углеродного следа. Инновации, такие как системы хранения энергии, интеллектуальные сети (smart grids), сверхпроводящие кабели и виртуальные электростанции (VPP), обеспечивают эффективное управление переменной генерацией и способствуют устойчивому развитию энергетических систем. Эти технологии помогают интегрировать возобновляемые источники, улучшать стабильность сети и сокращать экологические воздействия.

Важность интеграции новых технологий в существующие системы передачи электроэнергии для достижения более устойчивого и эффективного энергоснабжения. Инновационные подходы и зеленые технологии не только способствуют улучшению производительности и надежности энергетических систем, но и играют важную роль в достижении глобальных целей по устойчивому развитию и снижению воздействия на окружающую среду. Внедрение и развитие этих технологий открывает новые горизонты для энергетической отрасли и создает возможности для реализации экологически чистых и эффективных решений в передаче электроэнергии.

Контрольные вопросы:

1. Что такое высоковольтные линии постоянного тока (HVDC), и как они отличаются от традиционных систем переменного тока?
2. Какие основные преимущества систем HVDC по сравнению с системами переменного тока?
3. Назовите и опишите два типа систем HVDC и их особенности.

4. Какие компоненты входят в технологии FACTS, и какую роль они играют в модернизации электрических сетей?

5. Как системы STATCOM и SVC улучшают стабильность и надежность энергетических систем?

6. Объясните, как интеллектуальные сети (Smart Grids) способствуют интеграции возобновляемых источников энергии и управлению энергией в реальном времени.

7. Как сверхпроводящие кабели способствуют повышению эффективности передачи энергии, и какие примеры успешного применения этой технологии существуют?

8. Что такое виртуальные электростанции (VPP), и какие преимущества они предоставляют для управления распределенными источниками энергии?

9. Как зеленые технологии в передаче электроэнергии способствуют снижению углеродного следа и поддерживают устойчивое развитие?

10. Приведите примеры международных и национальных проектов, использующих HVDC и FACTS, и объясните их вклад в развитие устойчивых энергетических систем.