

УДК 621.316

## СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННО-ПОСТОЯННОГО ТОКА AC DC SYSTEMS

А.А. Кот, К.В. Гайков

Научный руководитель – Счасный В.П., к.т.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

[val.sc@mail.ru](mailto:val.sc@mail.ru)

A.Kot, K. Haikov

Supervisor – V. Schasniy, Candidate of Technical Sciences, Docent,  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Аннотаци:** В статье рассмотрены вопросы использования систем электроснабжения с преобразованием переменного тока в постоянный и обратно, возможность интегрировать возобновляемые источники энергии в линии электропередачи, используя новые типы преобразователей.

**Annotation.** The article discusses the use of power supply systems with the conversion of AC into DC and vice versa, the possibility of integrating renewable energy sources into power transmission lines using new types of converters.

**Ключевые слова.** Система электроснабжения, возобновляемые источники энергии, зеленая энергетика, преобразователи, высоковольтные линии, переменный, постоянный ток.

**Keywords.** Power supply system, renewable energy sources, green energy, converters, high-voltage AC, DC lines.

### Введение

За прошедшие десятилетия в мире, благодаря развитию цифровых технологий, различных областей промышленности, появилось множество потребителей электроэнергии переменного-постоянного тока, в том числе с встроенными выпрямителями. Всё больше набирает популярность зеленая энергетика с источниками возобновляемой энергии, для интегрирования которой в энергосистему требуется ряд преобразований. Благодаря развитию силовой электроники существенно улучшились характеристики преобразовательных подстанций, возросла доля распределенной генерации, вырабатывающей электроэнергию на постоянном токе, особенно на обособленных производственных объектах. Все больше используются системы постоянного тока как связующего звена различных источников генерации электроэнергии.

### Основная часть

Системы передачи постоянного тока (ППТ) имеют множество областей применения благодаря своим уникальным характеристикам, включая возможность передачи энергии на большие расстояния с минимальными потерями, более высокую эффективность работы, а также простоту интеграции с возобновляемыми источниками энергии. Ниже приведены основные области использования ППТ:

1. Передача электроэнергии на большие расстояния.

Межрегиональные и международные связи: ППТ используется для передачи электроэнергии от удаленных генераторов (включая ветряные и солнечные

электростанции) к крупным городам и промышленным центрам. Примеры включают системы HVDC, которые соединяют разные страны и регионы.

## 2. Интеграция возобновляемых источников энергии.

Солнечные и ветряные станции: множество солнечных и ветряных электростанций вырабатывают постоянный ток, который можно передавать по системам ППТ, снижая потери и обеспечивая эффективную интеграцию возобновляемых источников в электросети.

## 3. Системы мини-грид.

Энергоснабжение отдаленных районов: ППТ используются в мини-грид системах для обеспечения электроэнергией удаленных населенных пунктов особенно в тех регионах, где подключение к основной сети невозможно или экономически нецелесообразно.

## 4. Энергетические мосты и гибридные системы.

Объединение различных энергетических систем: ППТ применяются для связывания различных энергетических систем и интеграции источников энергии, работающих на переменном и постоянном токе. Это способствует более эффективному управлению потоками энергии.

## 5. Электроника и электромобили.

Зарядные станции для электромобилей: использование ППТ для зарядных станций электромобилей позволяет ускорить процесс зарядки благодаря высокой мощности постоянного тока.

## 6. Устойчивое развитие и борьба с энергетической бедностью.

Энергетическая независимость: ППТ могут использоваться для создания автономных источников энергии в развивающихся странах, что способствует улучшению доступа к электричеству и снижению зависимости от ископаемого топлива.

Мини-грид (minigrid) представляет собой небольшую локальную электросеть, которая может функционировать автономно или в связке с основной электросетью. Эти системы предназначены для обеспечения электроэнергией удаленных, изолированных или недостаточно обслуживаемых районов, где подключение к централизованной сети является экономически нецелесообразным или технически затруднительным.

Основные характеристики мини-грид:

- обслуживают ограниченную территорию, как правило, несколько населенных пунктов или отдельный поселок;
- могут работать независимо от основной сети, что особенно важно в регионах, подверженных частым отключениям электроэнергии или в ситуациях, когда основная сеть недоступна;
- используют комбинацию возобновляемых источников (таких как солнечная и ветровая энергия) и традиционных источников (таких как дизельные генераторы) для обеспечения стабильности энергоснабжения;
- большинство мини-гридов работают на низком и среднем напряжении, что упрощает распределение энергии и снижает затраты на инфраструктуру.

В компоненты мини-грид могут входить солнечные панели, ветряные турбины и дизельные генераторы, которые служат подстраховкой в случае нехватки энергии из возобновляемых источников энергии.

В преимущества данной системы можно отнести использование зеленой энергетики, которая способствует снижению углеродных выбросов и делает энергоснабжение более устойчивым. Также установка мини-гридов может быть более экономичной для небольших сообществ по сравнению с прокладкой линий электропередач к основной сети.

Они могут быть легко адаптированы к потребностям сообщества, включая масштабирование и модификацию в зависимости от изменения спроса на электроэнергию.

Самая протяженная ЛЭП постоянного электрического тока на 1100 кВ находится в Китае. ЛЭП Чанцзи-Гуцюань имеет длину более 3000 км и содержит более 6 тысяч опор.

У ЛЭП постоянного тока существуют множества преимуществ над ЛЭП переменного тока:

- существует такое соотношение длины линии, при которой стоимость передачи постоянного тока становится выгодней, чем переменного: примерно 700 км для воздушной линии 30-50 для кабелей;
- линия постоянного тока стоит дешевле, чем линии переменного тока из-за меньшего количества проводов, изоляторов, линейной арматуры и более легких опор.

Линия постоянного тока может поставлять сопоставимые объемы, или даже более высокие объемы энергии, используя только два набора проводников вместо трех. Поэтому, башни не должны быть такими большими, а также вы можете прокладывать более длинные линии постоянного тока под землей. Выбор линий постоянного тока экономически оправдан при их очень большой длине, когда удорожание подстанций компенсируется удешевлением линии (рисунок 1).

На нормальный режим работы линии постоянного тока не оказывают влияния ее реактивные параметры – емкость и индуктивность. Это значит, что падения напряжения на ней гораздо меньше, чем на линии переменного тока. Это создает предпосылки для увеличения радиуса действия линии постоянного тока по сравнению с ЛЭП переменного тока. Они идеальны для соединения разных энергосистем, не синхронизируя их при этом.

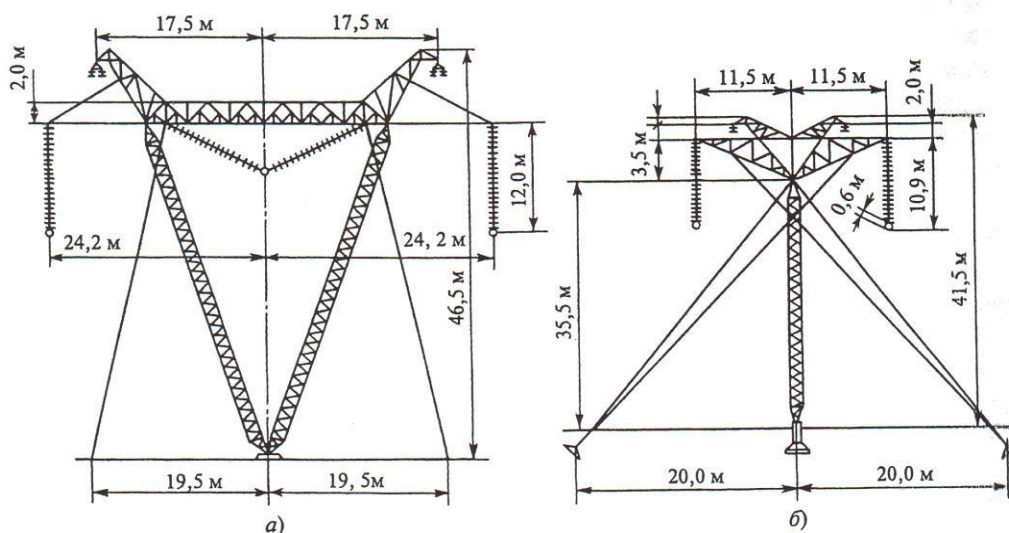


Рисунок 1. Пример промежуточной опоры электропередач переменного и постоянного тока в одном масштабе: *а* – опора ВЛ переменного тока 1150 кВ Экибастуз Урал: пропускная способность 5000 МВт, плотность тока 0,95 А/мм<sup>2</sup>, провод 8хАС 330, общая масса опоры 19,8 т; *б* – опора ВЛ постоянного тока Экибастуз – Центр: пропускная способность 6000 МВт, плотность тока 0,66 А/мм<sup>2</sup>, провод 5хАС 120 065, шаг расщепления 600 мм общая масса опоры 9,4т.

Можно взять пример Японии, где активно используются вставки постоянного тока, т.к. из-за исторических обстоятельств север Японии использует ток частотой 50 Гц, а юг — 60 Гц (рисунок 2).

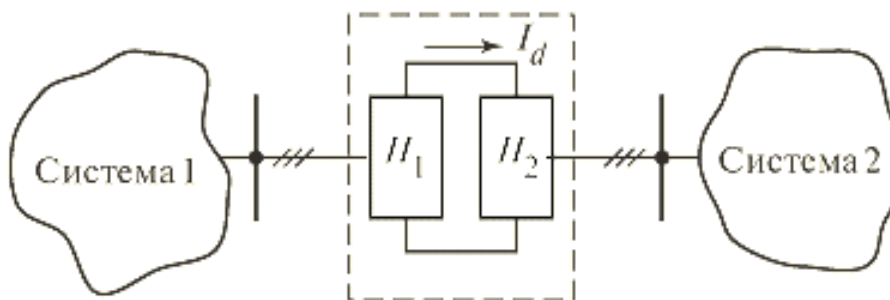


Рисунок 2. Пример вставки постоянного тока, где  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  – преобразователи.

Следует отметить, что при связи двух энергосистем на постоянном токе аварийные режимы в одной из энергосистем не отражаются на работе другой энергосистемы столь непосредственно, как это происходит при связи на переменном токе. Кроме того, исключается подпитка места короткого замыкания в одной энергосистеме со стороны другой. Поэтому, объединение энергосистем или ввод дополнительной мощности в энергосистему через электропередачу постоянного тока не приводит к увеличению токов короткого замыкания и не требует соответствующей замены всего оборудования, и, прежде всего, выключателей.

Намного выгоднее использовать расщепление фазы. Кроме уменьшения потерь и увеличения пропускной способности, увеличение с помощью расщепленной фазы эквивалентного радиуса провода позволяет снизить напряженность поля у поверхности этого эквивалентного провода, а значит, и снизить потери на коронный разряд.

Но у ЛЭП постоянного тока существуют и недостатки:

- установка дорогостоящих конечных подстанций с большим количеством преобразователей напряжения и остальной аппаратурой;
- установка сглаживающих устройств большой мощности. Преобразовательная техника довольно сильно искажает форму кривой напряжения на стороне переменного тока, а это значит и увеличение расходов, и снижение надежности.

Сегодня мир стала захватывать зеленая энергетика. Это означает, что были найдены способы получения постоянного и переменного тока при помощи возобновляемых источниках энергии. В него входят солнце, вода, ветер.

Учёные оценивают потенциал солнечной энергии как самый большой и доступный для человечества, прогнозируют, что к 2060 г. доля энергии солнца на мировом энергетическом рынке составит более 50 %, что опять же говорит о её популярности в будущем.

Системы солнечной энергии уже используются для подключения к электросети благодаря инверторам, однако в будущем они могут стать более интегрированными.

Например, развиваются технологии использования солнечной энергии для таких целей, как производство водорода, который может быть использован в качестве топлива для автомобилей и даже кораблей. Развитие гибридных систем, которые сочетают в себе несколько источников возобновляемой энергии, таких как солнечная и ветровая энергия, для увеличения надежности энергоснабжения.

Ещё есть ветряные турбины (ветряки), которые вырабатывают переменный ток, способствует снижению зависимости страны от импортного ископаемого топлива. Снижает уязвимость к колебаниям цен на мировом энергетическом рынке, перебоям в поставках и геополитическим конфликтам, связанным с импортом энергии. Ну а к минусам можно отнести шум и затраты на саму постройку ветряных лопастей, а также непостоянство.

Но как нам перенаправлять полученную энергию? Если использовать линии переменного тока, то это будет экономически невыгодно. Если линии постоянного тока, то на сегодняшний день не существует способа без больших потерь изменять в широких пределах напряжение постоянного тока, кроме трансформатора, который работает на переменном токе. Поэтому в рамках данной проблемы была придумана HVDC [1].

HVDC – это высоковольтная линия постоянного тока. При помощи данной технологии можно перенаправлять постоянный ток с высоким напряжением. Но так как просто взять и повысить напряжение постоянного тока нельзя, то была придумана преобразовательная станция. При помощи станции можно превращать переменный ток в постоянный, и наоборот. Смотря какой ток нам надо получить, станция может работать как инвертором, так и выпрямителем. Пример: если по линии течет постоянный ток, то станция играет роль инвертора, преобразует постоянный в переменный, попутно с этим повышая напряжение, а уже после становится выпрямителем и преобразует полученный переменный ток с

высоким напряжением в постоянный. Данные линии хороши при передаче электроэнергии на большие расстояния. Они также соединяют сети с различными частотами и характеристиками.

Сегодня можно выделить два основных типа преобразователей — старые LCC (преобразователи с линейной коммутацией) и современные VSC (преобразователи с источником напряжения), в зависимости от типа используемых компонентов [2].

Системы на основе преобразователей с линейной коммутацией (LCC) — магистрали высокого и сверхвысокого напряжения (до 800 кВ). Строительство таких сетей оптимально для передачи электроэнергии на дальние расстояния (более 700 км), например, когда крупный генерирующий объект расположен вдалеке от конечных потребителей. Такие системы носят название «двухточечных» HVDC. Данная система основана на тиристорах.

Вторая система — на преобразователях напряжения (VSC). Такие сетевые объекты имеют гораздо меньшие габариты по сравнению с LCC, что делает их оптимальным решением для подключения к магистральным сетям ветропарков на морских платформах. Это особенно актуально в случае, когда расстояние до берега превышает 50 км. Данная технология основана на транзисторах.

### **Заключение**

Зеленая энергетика — это новая веха в энергетике, логическое продолжение её развития с учётом наших знаний и возможностей. А высоковольтные линии постоянного тока дают этой возможностью воспользоваться.

Технологии преобразования переменного тока (AC) в постоянный (DC) и обратно играют ключевую роль в современной энергетике, особенно в контексте развития зеленой энергетике. Основные преимущества таких систем заключаются в следующем:

1. Эффективная передача энергии на большие расстояния и снижение потерь:
  - преобразование переменного тока в постоянный позволяет минимизировать потери при передаче электроэнергии на сверхдальние расстояния (более 700 км). Это особенно важно для интеграции удаленных возобновляемых источников энергии, таких как ветряные и солнечные электростанции, в общую энергосистему;

- линии постоянного тока (DC) имеют меньшие потери на больших расстояниях по сравнению с линиями переменного тока (AC). Это делает их экономически выгодными для передачи энергии от удаленных генераторов к потребителям;

- отсутствие влияния реактивных параметров (емкости и индуктивности) в линиях DC позволяет увеличить радиус действия передачи энергии.

2. Интеграция возобновляемых источников энергии:

- солнечные панели вырабатывают постоянный ток, а ветряные турбины переменный. Преобразовательные станции (HVDC) позволяют эффективно объединять эти источники, преобразуя ток в нужный формат для передачи и распределения;

- технологии HVDC обеспечивают стабильное подключение морских ветропарков и других удаленных объектов ВИЭ к основной сети.

### 3. Соединение энергосистем с разными характеристиками:

- преобразовательные станции позволяют объединять энергосистемы с разными частотами (например, 50 Гц и 60 Гц) без необходимости синхронизации. Это особенно важно для международных энергетических проектов и интеграции возобновляемых источников энергии.

Преобразование переменного тока в постоянный и обратно является важным элементом современной энергетики, особенно если мы говорим про зеленую энергетику. Оно обеспечивает эффективную передачу энергии, интеграцию ВИЭ, снижение потерь и поддержку устойчивого развития. Эти технологии играют ключевую роль в создании гибких, надежных и экологически чистых энергосистем будущего. Грамотное использование переменного и постоянного тока вместе – ключ к успеху человечества.

### Литература

1. POWER: Новости и технологии для мировой энергетической отрасли: [сайт]. – URL: <https://www.powermag.com/benefits-of-high-voltage-direct-current-transmission-systems/> (дата обращения: 18.02.2025)
2. Электрик Инфо: [сайт]. – URL: <https://electrik.info/main/fakty/1820-peredacha-postoyannogo-toka.html> (дата обращения: 18.02.2025)