

УДК 621.316.12 (575.2)+(470+571)
DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-8-25-29

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В.И. Гусева, В.В. Бологова, А.А. Герасимова

Аннотация. Энергоснабжение за счет использования сетей постоянного тока – актуальная проблема как в Кыргызской Республике, так и Российской Федерации, поскольку развитие технологий постоянного тока поможет решить ряд задач социально-экономического развития стран, в том числе: обеспечение лучшего качества электроэнергии для потребителей; развитие энергосберегающих технологий как следствие уменьшения потерь при передаче электроэнергии. Предлагается использование сети с применением элементов технологии постоянного тока как альтернативы по отношению к сети переменного тока.

Ключевые слова: электроснабжение; сети постоянного тока; потери при передаче электроэнергии; развитие технологий постоянного тока; повышение эффективности работы системы электроснабжения.

ТУРУКТУУ ТОК ТАРМАКТАРЫН КОЛДОНУУ АРКЫЛУУ ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫ МЕНЕН КАМСЫЗДОО СИСТЕМАСЫНЫН НАТЫЙЖАЛУУЛУГУН ЖОГОРУЛАТУУ

В.И. Гусева, В.В. Бологова, А.А. Герасимова

Аннотация. Туруктуу ток тармактарын колдонуу аркылуу энергия менен камсыздоо Кыргыз Республикасында да, Россия Федерациясында да актуалдуу көйгөй болуп саналат, анткени туруктуу ток технологияларын өнүктүрүү өлкөлөрдүн социалдык-экономикалык өнүгүүсүнүн бир катар көйгөйлөрүн чечүүгө жардам берет, анын ичинде: керектөөчүлөр үчүн электр энергиясынын сапатын жакшыртуу; электр энергиясын берүү учурундагы жоготууларды азайтуунун натыйжасында энергияны үнөмдөөчү технологияларды өнүктүрүү. Өзгөргө ток тармагына альтернатива катары туруктуу ток технологиясынын элементтерин колдонуучу тармакты колдонуу сунушталууда.

Түйүндүү сөздөр: электр менен камсыздоо; туруктуу ток тармактары; электр энергиясын берүү учурундагы жоготуулар; туруктуу ток технологияларын өнүктүрүү; электр менен жабдуу системасынын натыйжалуулугун жогорулатуу.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE ELECTRICITY SUPPLY SYSTEM THROUGH THE USE OF DC NETWORKS

V.I. Guseva, V.V. Bologova, A.A. Gerasimova

Abstract. Power supply through the use of direct current networks is an urgent problem both in the Kyrgyz Republic and in the Russian Federation, since the development of direct current technologies will help solve a number of problems of socio-economic development of countries. It is substantiated that the development of DC technologies will help solve a number of problems of the country's socio-economic development, including: ensuring the best quality of electricity for consumers; development of energy-saving technologies, as a consequence of reducing losses in electricity transmission. It is proposed to use a network using elements of DC technology as an alternative to the AC network.

Keywords: power supply; DC networks; losses in electricity transmission; development of DC technologies; improving the efficiency of the power supply system.

В настоящее время в связи с широким применением и большим ростом количества различных типов электропотребляющих устройств условия работы энергосистем все более усложняются, что создает предпосылки для использования сети с применением элементов технологии постоянного тока как альтернативы сети переменного тока.

Мировое применение электропередач на основе постоянного тока. За последние двадцать лет в мировой практике можно выделить следующие результаты достижений развития передачи постоянного тока (ППТ) [1]:

- 1) ППТ на напряжение ± 800 кВ – как полностью освоенный элемент энергосистемы и опытная электропередача на напряжении ± 1100 кВ;
- 2) промышленное освоение многоподстанционных сетей ППТ с подстанциями на основе преобразователей напряжения;
- 3) увеличение единичной мощности преобразователя напряжения до 1000 МВт;
- 4) создание эффективного выключателя постоянного тока, в том числе с механическим коммутатором;
- 5) широкое использование статистических синхронных компенсаторов (СТАТКОМов) вместо статистических теристорных компенсаторов (СТК) в качестве средств управления напряжением и реактивной мощностью в сетях переменного тока.

Наиболее активно технология передачи постоянного тока применяются в таких странах, как Китай, Индия, Бразилия, США и Канада. В качестве примера можно выделить следующие объекты:

- Линия электропередачи Rio Madeira в Бразилии – это высоковольтная линия электропередачи постоянного тока напряжением 600 кВ, которая была введена в эксплуатацию в ноябре 2013 года и способна передавать 7.1 ГВт. По линии передается энергия с гидроэлектростанции Санто-Антонио и Жираву на северо-западе Бразилии в крупные нагрузочные центры на юго-востоке страны.
- ЛЭП Цзиньпин-Суань в Китае – это принадлежащая Китайской государственной сетевой корпорации линия электропередачи напряжением ± 800 кВ, мощностью 7.2 ГВт, которая была введена в эксплуатацию в декабре 2012 года. Она проходит через 8 провинций Китая и передает энергию, вырабатываемую на гидроэлектростанциях Гуанди, Цзиньпин и Сычуань.
- Надземная ЛЭП Сянцзянба-Шанхай передает энергию от гидроэлектростанции Сянцзянба на юго-западе Китая в Шанхай. ЛЭП состоит из одной воздушной линии и 28 высоковольтных и специальных высоковольтных преобразователей.

Помимо воздушных линий электропередач используются и кабельные линии, прокладываемые, к примеру, по дну океана. Такой способ помогает разделенным морями странам поддерживать соединение энергосистем. Наиболее ярким примером такой технологии является ветка между Итальянским городом Чепатти и муниципалитетом Котор в Черногории. Данная сеть, пролекая по дну Адриатического моря поставяет электроэнергию в Италию. Следует отметить, что применение кабельной линии на постоянном токе в этой ситуации способствует снижению потерь в кабеле.

Применение электропередач на основе постоянного тока в России. В Российской Федерации на протяжении последних лет не было отмечено положительных тенденций в использовании технологий постоянного тока. Активное внедрение данной технологии осуществлялось, в основном, в прошлом веке, среди них можно отметить:

- высоковольтную линию постоянного тока Москва–Кашира;
- высоковольтную линию постоянного тока Волгоград–Донбасс;
- Выборгский преобразовательный комплекс.

На протяжении последнего десятилетия рядом исследователей были предприняты попытки поиска путей для более широкого использования электропередачи постоянного тока в России. Основными предпосылками для этого являлись следующие факторы:

- повышение уровня надежности энергорайона и объединенной энергосистемы в целом;

- экономия затрат при строительстве воздушных и кабельных линий на длительные расстояния. По некоторым оценкам было отмечено, что капитальные затраты на линию постоянного тока длиной в 1 километр на 15–20 % ниже сопоставимой линии переменного тока. Однако данные затраты могут перекрываться необходимостью больших капитальных вложений в преобразовательную подстанцию, которая в свою очередь зависит непосредственно от передаваемой мощности. В таблице 1 приведены данные о соотношении удельных стоимостей преобразовательной подстанции и диапазона ее возможных мощностей на основании изучения зарубежных источников [2, 3].

Таблица 1 – Соотношение диапазона мощностей и удельных стоимостей преобразовательной подстанции

Диапазон мощностей	Удельная стоимость подстанции
<1000 МВт	57–70 долл./кВт
1000–2000 МВт	53–57 долл./кВт
2000–4000 МВт	47–53 долл./кВт

Некоторые эксперты [4] выделяют в качестве критической длины для условий применения линий постоянного тока в России расстояния в 400–700 километров при мощности электропередачи в 2000–3000 МВт. При таком соотношении применение ППТ становится выгодным из-за того, что удешевление строительства воздушной линии перекрывает удорожание подстанции по сравнению с переменным током. Однако стоит отметить, что данные показатели напрямую зависят от климатических условий района. Так, к примеру, для северных территорий критическая длина может снижаться на 150–200 километров. На рисунке 1 приведены данные по определению критической длины ЛЭП ПТ [4] при уменьшении потерь в сетях при передаче электроэнергии.

Анализ международных источников [2, 5] показывает, что при передаче мощности до 2000 МВт и дальности воздушных линий для передачи электроэнергии до 400 км, потери в сетях постоянного тока аналогичны потерям в сетях переменного. Однако при малой мощности и большем расстоянии, примерно в 600–2000 км, потери в сетях постоянного тока сокращаются примерно на 1–2 % по сравнению с величиной в сетях переменного тока (рисунок 2).

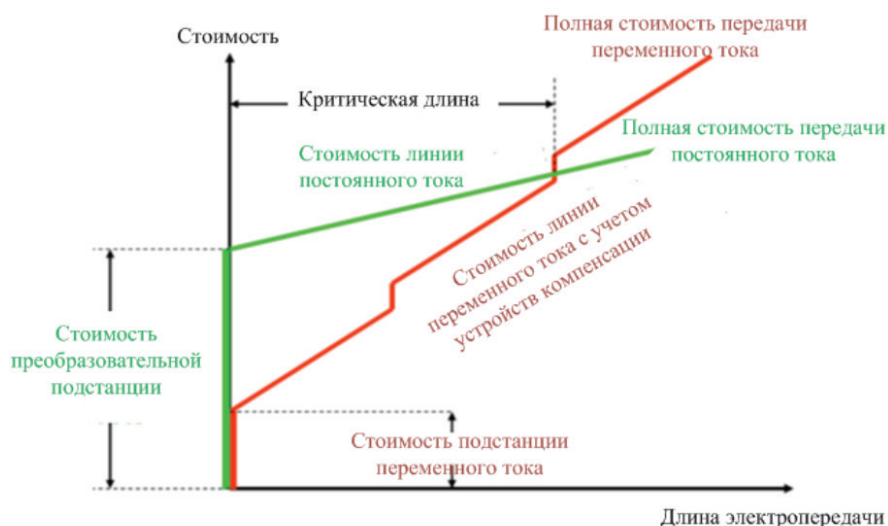


Рисунок 1 – Критическая длина воздушных линий постоянного тока

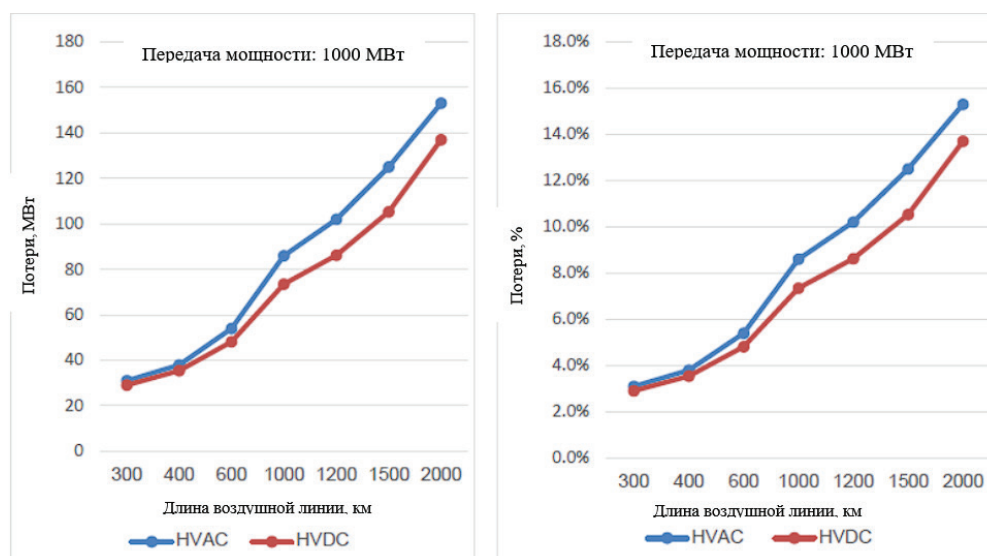


Рисунок 2 – Соотношение потерь в сетях переменного и постоянного тока при передаче мощности в 1000 МВт

На сегодняшний день отсутствуют примеры существующих проектов применения передачи электроэнергии на основе постоянного тока на дальние расстояния. Однако в опубликованном Системным оператором Единой энергетической системы сводном отчете «Схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2025–2030 годы» приводятся предлагаемые для реализации проекты ППТ [6]. В качестве примера можно выделить проект строительства биполярной ППТ из центральной части Объединённой энергетической системы (ОЭС) Сибири (со строительством преобразовательной подстанции 500 кВ) в юго-восточную часть ОЭС Сибири с пропускной способностью порядка 1500 МВт. Реализация данного проекта позволит:

- покрыть прогнозируемый дефицит мощности в юго-восточной части ОЭС Сибири;
- обеспечить экономию затрат на сооружение альтернативных технических решений по строительству протяжённых воздушных линий переменного тока напряжением 500 кВ;
- обеспечит возможность управления потоком мощности с максимальной эффективностью использования пропускной способности электрической сети;
- обеспечит возможность корректировки масштаба проекта ввиду увеличения его пропускной способности.

Несмотря на то, что за последние 40 лет в России в значительной степени утрачены навыки проектирования и недооценены производственные возможности в области техники передачи электроэнергии на основе постоянного тока, данный фактор, на наш взгляд, не должен влиять на принимаемые решения об использовании этой технологии. Следует учитывать также и положительный эффект от создания линий постоянного тока.

По мнению ряда экспертов [1], при внедрении технологии передачи постоянного тока скорее всего придется использовать достижения зарубежных коллег, а также заняться изучением и разработкой современных схемно-технических решений. Кроме того, не стоит забывать, что в России есть предприятия, на которых изготавливается часть необходимого оборудования, например, трансформаторно-реакторное оборудование.

В этой связи следует обратить внимание на Китай, где за последние десятилетия рекордно возросло количество использования технологии электропередачи на основе постоянного тока. На данный

момент КНДР является лидирующей страной в мире по внедрению использования постоянного тока. Китайский опыт напрямую указывает на целесообразность использования технологии передачи на основе постоянного тока и разумного сочетания развития собственного производства с привлечением зарубежного опыта.

Выводы. Отмечая рост мировой тенденции по развитию сетей на основе постоянного тока, при принятии решений по их внедрению необходимо учитывать и имеющиеся особенности территории и потребителей, поскольку эта технология будет эффективной не во всех случаях. Для более обоснованного решения будет необходимо разработать методику оценки экономической эффективности строительства сетей постоянного тока с учетом технических, технологических, политических и других факторов.

Поступила: 01.08.2025; рецензирована: 15.08.2025; принята: 18.08.2025.

Литература

1. Герасимов А.С. Использование передачи постоянного тока в электроэнергетике / А.С. Герасимов, Л.А. Кошечев, А.А. Лисицин // Энергия единой сети. 2018. № 6.
2. Economic Assessment of HVDC links // Cigre. 2001. URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/186-economic-assessment-of-hvdc-links.html> (дата обращения: 19.03.2025).
3. Voltage Source Converter (VSC) HVDC for Power Transmission – Economic Aspects and Comparison with other AC and DC Technologies // Cigre. 2012. URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/492-voltage-source-converter-vsc-hvdc-for-power-transmission-economic-aspects-and-comparison-with-other-ac-and-dc-technologies.html> (дата обращения: 19.03.2025).
4. Концепция развития электропередач и вставок постоянного тока в ЕЭС России // ОАО «НИИПТ». 2016. URL: http://сигрэ.рф/research_commitets/ik_rus/b4_rus/events/main/%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B5%D0%BD%D1%82_%D0%BD%D1%82%D1%81_v4.pdf (дата обращения: 19.03.2025).
5. Analysis of HVDC for Vietnam // Cigre. 2020. URL: https://ens.dk/sites/ens.dk/%EF%AC%81les/Globalcooperation/hvdc_for_pdp8_support_eng0107.pdf (дата обращения: 19.03.2025), эта ссылка сейчас не работает; URL: https://www.researchgate.net/publication/378544381_Energy_Transition_in_Vietnam_A_Strategic_Analysis_and_Forecast (дата обращения: 11.08.2025).
6. СиПР ЕЭС России 2025–2030 гг. Утвержденный Приказом Минэнерго России от 29 ноября 2024 года № 2328. URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc2024/sipr-ehehs-2024-2029/> (дата обращения: 19.03.2025).