

### Раздел 3. «IT-технологии, энергетика, автоматизация и вычислительная техника»

МРНТИ 45.43.99  
УДК: 620.92

DOI [10.53002/041](https://doi.org/10.53002/041)

А.В.Никульшин, Е.В.Кунтуш

*Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан  
(E-mail: a.nikulshin@tttu.edu.kz, ye.kuntush@tttu.edu.kz)*

#### **Перспективы внедрения технологий HVDC в энергосистему Казахстана на основе международного опыта**

В статье исследуются перспективы внедрения технологий высоковольтной передачи постоянного тока (HVDC) в энергосистему Казахстана, опираясь на международный опыт и современные технологические решения. Рассмотрены принципы работы HVDC-систем, включающие преобразование переменного тока в постоянный с помощью тиристорных (LCC) и IGBT-преобразователей (VSC), а также их сравнительные характеристики: эффективность, управление реактивной мощностью, уровень гармонических искажений и применимость в различных условиях эксплуатации. Проведен анализ мирового развития HVDC-линий, в частности в Китае и Индии, с учётом мощностей до  $\pm 1100$  кВ и передачи энергопотоков свыше 12 ГВт. Обоснована необходимость внедрения HVDC в Казахстане для повышения надёжности, снижения потерь на линиях протяжённостью до 1000 км и интеграции возобновляемых источников энергии с установленной мощностью более 7 ГВт. Предложены стратегические маршруты HVDC-линий, включая направления Экибастуз–Алматы и Актобе–Атырау, а также мероприятия по технико-экономическому обоснованию и международному сотрудничеству.

*Ключевые слова:* HVDC, высоковольтная передача постоянного тока, VSC-преобразователи, LCC-преобразователи, энергосистема Казахстана, интеграция ВИЭ, электрические потери, линии электропередачи, международный опыт, электросетевые технологии.

#### *Введение*

##### *Принцип работы HVDC*

Система передачи электроэнергии постоянным током высокого напряжения (HVDC) отличается от традиционной системы передачи переменным током высокого напряжения (HVAC) своей способностью передавать электрическую энергию на большие расстояния с минимальными потерями [1].

##### *Методы и материалы*

Работа начинается с преобразования переменного тока, который генерируется на электростанции, в постоянный. Этот процесс осуществляется с помощью мощных преобразователей, также известных как выпрямители, которые устраняют переменные компоненты электрического сигнала, оставляя только постоянную составляющую. Далее постоянный ток передается по высоковольтным линиям электропередачи.

Отсутствие переменной составляющей устраняет эффект реактивной мощности, характерный для систем HVAC, что минимизирует потери энергии в процессе передачи [2].

Кроме того, линии HVDC благодаря своей конструкции и технологии лучше подходят для подземных и подводных соединений.

На конечной подстанции постоянный ток снова преобразуется в переменный при помощи инверторов. Это необходимо для совместимости с местными электрическими сетями, которые традиционно работают на переменном токе. Такие двойные преобразования энергии обеспечивают

### **Раздел 3. «IT-технологии, энергетика, автоматизация и вычислительная техника»**

возможность надежной и эффективной передачи электричества между регионами, даже если они имеют разные частоты сети [1, 2].

#### *Преимущества HVDC перед HVAC*

Система HVDC обладает рядом уникальных преимуществ, которые делают её востребованной в современной энергетике:

1. **Снижение потерь энергии:** благодаря отсутствию реактивной мощности и меньшему сопротивлению линии HVDC обеспечивают более эффективную передачу энергии. Это особенно важно при транспорте на большие расстояния, где потери в системах HVAC могут быть значительными [3].

2. **Совместимость между сетями:** HVDC позволяет соединять электросети, работающие на разных частотах или имеющие разные стандарты. Это обеспечивает гибкость и надежность в масштабах межрегиональных или даже международных проектов [4].

3. **Экономия пространства:** Линии HVDC требуют меньше проводов и материалов для изоляции, что делает их более компактными. Это особенно актуально при установке линий в условиях ограниченного пространства, например, под землёй или под водой.

4. **Экологичность:** за счёт высокой эффективности и меньшего потребления материалов HVDC-системы оказывают меньшее воздействие на окружающую среду, способствуя развитию более устойчивой энергетики [3, 4].

#### *Типы преобразователей HVDC: VSC и LCC*

Преобразователи на основе источника напряжения (VSC-HVDC) используют технологию источника напряжения для преобразования переменного тока в постоянный и наоборот. Они основаны на биполярных транзисторах с изолирующим затвором (IGBT), которые обеспечивают возможность включения и выключения тока [5].

Преобразователи типа VSC обладают высокой гибкостью управления, позволяя независимо регулировать активную и реактивную мощность. Они подходят для работы с слабыми сетями и могут обеспечивать питание пассивных нагрузок.

Благодаря технологии широтно-импульсной модуляции (ШИМ), VSC-HVDC имеют низкий уровень гармонических искажений, что снижает необходимость в фильтрах. Эти преобразователи часто используются для подключения возобновляемых источников энергии, таких как ветровые и солнечные электростанции, а также для подводных и подземных кабельных систем [6].

Преобразователи с естественной коммутацией (LCC-HVDC) основаны на тиристорах и используют технологию коммутации линии для преобразования энергии. Они требуют сильной сети с высокой короткозамкнутой мощностью для надежной работы. Преобразователи типа LCC характеризуются высокой эффективностью и способны передавать большие объемы энергии на дальние расстояния. [7]

Однако они требуют значительных ресурсов для компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник, что увеличивает площадь установки. LCC-HVDC не могут работать с пассивными нагрузками и подвержены сбоям коммутации при нарушениях на стороне переменного тока. Они широко применяются для передачи энергии через воздушные линии и для межсетевых соединений. [8]

Выбор между LCC-HVDC и VSC-HVDC (таблица 1) зависит от конкретных условий проекта. LCC-HVDC идеально подходит для магистральных линий передачи на дальние расстояния, особенно в случаях, когда требуется передача больших мощностей (до 12 ГВт) с высоким напряжением (до  $\pm 1100$  кВ) и низкими потерями.

Однако данная технология требует мощной сети переменного тока, чувствительна к коммутационным отказам и нуждается в значительных компенсирующих устройствах [5-8].

### Раздел 3. «IT-технологии, энергетика, автоматизация и вычислительная техника»

Таблица 1

Сравнение преобразователей типа VSC и LCC

Параметр	VSC-HVDC	LCC-HVDC
Технология	IGBT, модуляция ширины импульса (ШИМ)	Тиристоры, коммутация линии
Гармонические искажения	Низкие, минимальная фильтрация	Высокие, требуется значительная фильтрация
Реактивная мощность	Независимое управление	Требует компенсации
Работа с пассивными нагрузками	Возможна	Невозможна
Эффективность	Подходит для сетей с напряжением до 640 кВ	Подходит для сетей с напряжением от 500 до 800 кВ
Применение	Кабельные системы, возобновляемая энергетика	Дальние воздушные линии, межсетевые соединения

С другой стороны, *VSC-HVDC* обеспечивает *большую гибкость в управлении потоком мощности*, может работать в слабых энергосистемах и подходит для интеграции возобновляемых источников энергии. Благодаря *способности независимого управления активной и реактивной мощностью*, он используется для межсетевых соединений, подключения морских ветропарков и работы в распределенных энергосистемах.

Однако *VSC-HVDC* ограничен по передаваемой мощности (до 3-4 ГВт) и напряжению (до  $\pm 640$  кВ) и имеет более высокие потери на преобразовательных станциях [5, 6].

Таким образом, *LCC-HVDC* остается основой для мощных линий электропередачи (ЛЭП) постоянного тока на дальние расстояния, в то время как *VSC-HVDC* активно развивается и используется для гибких энергосистем будущего [5-8].

#### *Мировой опыт применения HVDC-систем передачи*

Развитие технологий передачи HVDC активно продолжается, и количество реализованных и запланированных проектов демонстрирует стабильный рост.

Согласно анализу, опубликованному Bloomberg New Energy Finance (BNEF) в 2016 году, общее количество HVDC-проектов, введенных в эксплуатацию с 1965 года, а также тех, что находятся в стадии разработки, составляет более 250. К 2022 году суммарная мощность HVDC-линий по всему миру превысила 400 ГВт [9].

Наибольшее распространение технология получила в Азии, на долю которой приходится около 52% от общей установленной мощности, что объясняется необходимостью передачи электроэнергии на большие расстояния между удаленными объектами генерации и центрами потребления.

Особенно активными участниками этого рынка являются Китай и Индия, которые используют HVDC для интеграции возобновляемых источников энергии и повышения эффективности энергосистем [9]. Оценочное распределение HVDC-инфраструктуры по регионам мира показано на рисунке 1 [9].

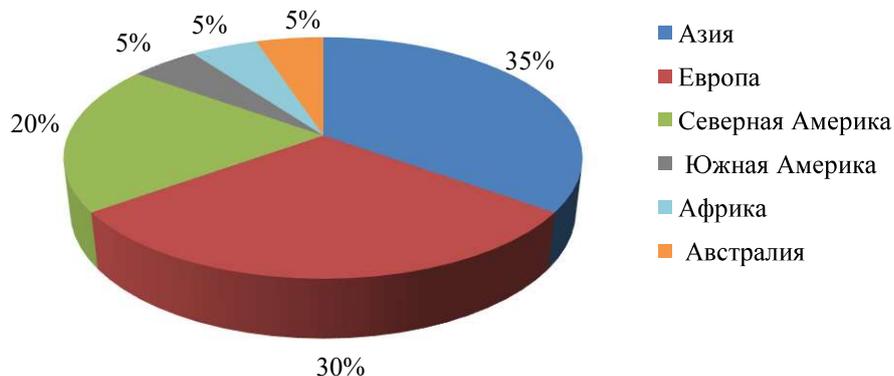


Рисунок 1– Распределение сетей HVDC в мире

### Раздел 3. «IT-технологии, энергетика, автоматизация и вычислительная техника»

#### Китай – лидер по внедрению HVDC

Китай занимает лидирующую позицию в мире по внедрению технологий HVDC. Основной причиной активного развития данного направления является значительная географическая разница между регионами генерации и потребления электроэнергии. Западные и северные районы страны богаты гидроэнергетическими и угольными ресурсами, тогда как основные промышленные и экономические центры сосредоточены на восточном побережье. Для эффективной передачи электроэнергии на расстояния, превышающие 1000-3000 км, активно применяются HVDC-линии, обеспечивающие снижение потерь и повышение надежности энергоснабжения [10].

По состоянию на 2023 год, в Китае эксплуатировалось более 50 HVDC-линий, включая проекты напряжением  $\pm 500$  кВ,  $\pm 800$  кВ и новейшие  $\pm 1100$  кВ, что делает Китай ведущей державой в данной области. Китай активно инвестирует в строительство новых объектов HVDC, а также разрабатывает технологии для повышения эффективности существующих линий. Суммарная передаваемая мощность HVDC-линий в Китае превышала 350 ГВт, а к 2030 году планируется увеличение до 675 ГВт [10].

#### Стратегия развития HVDC в Индии: ключевые проекты и перспективы

Индия активно развивает технологии HVDC для повышения эффективности и надёжности своей энергосистемы. Важными стратегическими проектами являются линия HVDC Талчер–Колар, соединяющая восточный (Талчер, Одиша) и южный (Колар, Карнатака) регионы, с протяжённостью 1450 км и мощностью 2500 МВт.

Другой крупный проект – линия Райгарх–Пугалур длиной 1830 км, рассчитанная на 6000 МВт, которая интегрирует центральный и южный регионы в стране. Индия также планирует международное соединение HVDC с Шри-Ланкой, включающее 285 км линий, из которых 50 км будут проложены под водой, что позволит расширить энергетическое сотрудничество в Южной Азии [11].

Китай значительно опережает Индию по масштабам и темпам внедрения HVDC, активно применяя передовые технологии и реализуя мегапроекты. Индия, в свою очередь, делает важные шаги в развитии HVDC для повышения стабильности энергосистемы, но её проекты пока уступают китайским по мощности и протяжённости. На рисунке 2 представлено сравнение темпов развития HVDC-сетей в Индии и Китае.

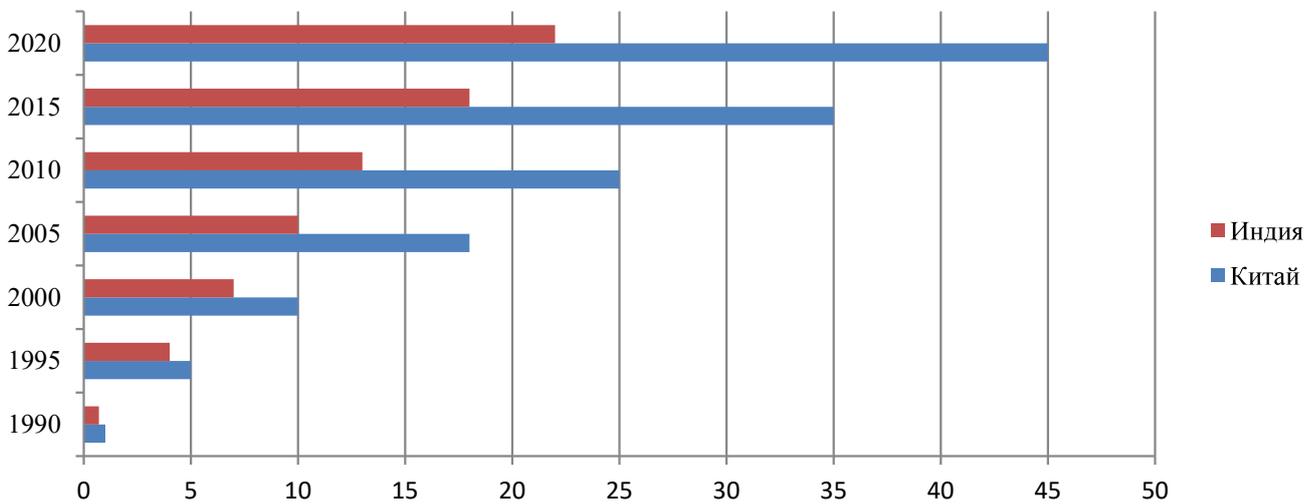


Рисунок 2– Сравнительный график развития сетей в Китае и Индии

#### Ключевые различия в развитии HVDC-инфраструктуры в Китае и Индии:

1. Масштаб внедрения: Китай демонстрирует более высокий уровень развития HVDC-сетей как по количеству реализованных проектов, так и по их установленной мощности. Это обусловлено значительными инвестициями и координированной государственной политикой в области электроэнергетики.

2. Технологический уровень: Китай активно реализует проекты на напряжениях до 1100 кВ, включая линии ультравысокого напряжения (UHVDC), в то время как в Индии на сегодняшний день внедряются решения с максимальным уровнем 800 кВ.

### **Раздел 3. «IT-технологии, энергетика, автоматизация и вычислительная техника»**

3. Стратегические цели: В Китае основное применение HVDC связано с передачей энергии от удалённых центров генерации электроэнергии (в том числе гидро- и угольных станций) к промышленным регионам. В Индии же ключевое внимание уделяется интеграции возобновляемых источников энергии (солнечных и ветровых) и обеспечению стабильной работы энергосистемы [9-11].

#### *Результаты и обсуждение*

##### *Перспективы использования HVDC в Казахстане*

Энергетическая система Казахстана представлена 71 электростанцией с совокупной установленной мощностью 18 572 МВт. Основной объём электроэнергии вырабатывается на тепловых электростанциях (ТЭС), преимущественно угольных, среди которых одной из крупнейших является Экибастузская ГРЭС-2. В то же время в последние годы наблюдается устойчивый рост доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в структуре генерации. К 2021 году установленная мощность объектов ВИЭ достигла 7 086 МВт, а по итогам 2024 года их вклад в общий объём выработки составил 6,43% [12].

##### *Ключевые характеристики энергетического сектора Казахстана:*

1. Электрогенерация: в стране эксплуатируется 71 электростанция с общей установленной мощностью 18 572 МВт. Основную долю выработки обеспечивают тепловые электростанции, преимущественно угольные.
2. Возобновляемая энергетика: К 2024 году доля ВИЭ в общем объёме производства электроэнергии достигла 6,43%, при установленной мощности 7 086 МВт в 2021 году.
3. Линии электропередачи: По состоянию на 1 января 2021 года общая протяжённость линий электропередачи составила 23 383 км.
4. Потребление энергии: Наибольшее энергопотребление приходится на промышленные предприятия, в частности в горнодобывающем и металлургическом секторах, а также на нужды населения [12].

На основе успешного опыта Китая и Индии, Казахстану целесообразно рассмотреть внедрение технологий HVDC для решения ключевых задач в электроэнергетике: обеспечения эффективной передачи энергии на большие расстояния, интеграции с ВИЭ, повышения надёжности и повышения общей энергоэффективности страны.

Первым этапом должна стать разработка технико-экономического обоснования с учётом протяжённости сетей, распределения генерации и потребления. Приоритетными считаются направления, испытывающие энергетический дефицит, в частности — линии от Экибастузской ГРЭС к южным регионам (Алматинская и Жамбылская области) и к западным районам страны, зависящим от поставок из России.

В дальнейшем следует инициировать пилотные HVDC-проекты, например, на направлениях Экибастуз – Алматы и Актобе – Атырау, где требуется передача крупных объёмов энергии с минимальными потерями. Важным элементом стратегии является сотрудничество с международными партнёрами, особенно Китаем и Индией, для привлечения технологий, снижения затрат и ускорения модернизации энергетической инфраструктуры.

##### *Карта возможных маршрутов HVDC-линий в Казахстане*

Проектная модель предусматривает интеграцию центров генерации, потребления и передачи энергии с использованием HVDC-технологий.

##### *Основные элементы модели:*

1. Ключевые потребители: Астана, Алматы, Шымкент, Атырау, Актау, Кызылорда.
2. Главные направления HVDC-линий: передача электроэнергии от угольных электростанций Экибастуза в направлении Астаны и Алматы; интеграция солнечной и ветровой генерации, расположенной в южных регионах, в общенациональную энергосистему.

##### *Характеристика основных центров потребления:*

1. Астана – административный центр с интенсивным ростом энергопотребления.
2. Алматы – крупнейший мегаполис с высоким уровнем сезонных нагрузок, особенно в зимний период.

### Раздел 3. «IT-технологии, энергетика, автоматизация и вычислительная техника»

3. Шымкент – динамично развивающийся южный регион с растущими энергетическими потребностями.

4. Атырау – стратегически важный нефтегазовый центр, требующий устойчивого и надёжного энергоснабжения.

*Приоритетные маршруты HVDC-линий:*

1. Север → Юг (Экибастуз → Астана → Алматы → Шымкент) – магистраль для передачи избыточной энергии с угольных ТЭС в густонаселённые южные регионы.

2. Запад → Центр (Атырау → Актау → Кызылорда) – соединение западных нефтегазовых регионов с центральной частью энергосистемы страны.

3. Возобновляемые источники → магистральные сети (Жамбылская ВЭС, Кызылординская СЭС → Алматы, Астана) – маршруты для подключения объектов возобновляемой генерации к HVDC-инфраструктуре.

#### Выводы

Внедрение HVDC-технологий в Казахстане должно учитывать пространственное соответствие между регионами генерации и потребления электроэнергии. Ключевыми направлениями являются маршруты Экибастуз–Алматы (через Караганду и Астану) и соединения западных и южных регионов, что позволит снизить потери и повысить надёжность передачи. Реализация подобных проектов требует системного подхода, включающего технико-экономическое обоснование, развитие нормативной базы и кадрового потенциала. В долгосрочной перспективе это создаст основу для устойчивого функционирования и модернизации энергетической системы страны.

#### Список литературы

1. B. Albannai, Comparative Study of HVAC and HVDC Transmission Systems with Proposed Machine Learning Algorithms for Fault Location Detection, M.Sc. Thesis, Arizona State University, USA, (2019).
2. V. Lackovic, Principles of HVDC Transmission, Continuing Education and Development, Inc., USA, (no date). Режим доступа: <https://www.cedengineering.com/userfiles/Principles%20of%20HVDC%20Transmission-R1.pdf> (Дата обращения 03.04.2025)
3. A. Kalair, N. Abas, N. Khan, Comparative study of HVAC and HVDC transmission systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59 (2016), 1653–1675. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.288>
4. A. Shah Ayobe, S. Gupta, Comparative investigation on HVDC and HVAC for bulk power delivery, Materials Today: Proceedings, 49 (2022), 2228–2236. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.025>
5. Z. Pei, P. Liu, A. Zhang, Y. Zhou, An overview on VSC-HVDC power transmission systems, International Journal of Control and Automation, 9 (5) (2016), 33-44. <https://doi.org/10.14257/ijca.2016.9.5.04>
6. R. Gandotra, Kanika, K. Pal, The VSC-HVDC transmission system performance assessment, in Advancements & Key Challenges in Green Energy and Computing (AKGEC 2023), Journal of Physics: Conference Series, 2570 (2023), 012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2570/1/012025>
7. H. Jiang, J. Fang, T. Zhang, X. Fan, The area comparison of LCC-HVDC and VSC-HVDC, Science Discovery, 5 (7) (2017), 502–508. <https://doi.org/10.11648/j.sd.20170507.15>
8. PSMA Consulting, LCC HVDC vs VSC HVDC Transmission Systems, Режим доступа: <https://www.psmiconsulting.com/power-system-studies/hvdc/lcc-hvdc-vs-vsc-hvdc-transmission-systems> (Дата обращения 03.04.2025)
9. N. Aspinall, Electric Transmission: HVDC and Interconnectors, Bloomberg New Energy Finance (BNEF), (2016).
10. M. Ardelean, P. Minnebo, A China-EU Electricity Transmission Link: Assessment of Potential Connecting Countries and Routes, EUR 29098 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, (2017). <https://doi.org/10.2760/67516>

### **Раздел 3. «IT-технологии, энергетика, автоматизация и вычислительная техника»**

11. S. Mitra, D.K. Pandaraboyana, K. Arulvendhan, J.D. Srinivasan, HVDC in Indian Power Sector, International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), 8 (1S4) (2019), 509–514. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3345684>

12. Министерство энергетики Республики Казахстан, Официальный сайт, Режим доступа: <https://www.gov.kz/memleket/entities/energo?lang=ru> (Дата обращения 03.04.2025)

А.В.Никульшин, Е.В.Кунтуш

#### **Халықаралық тәжірибе негізінде Қазақстанның энергетикалық жүйесіне HVDC технологияларын енгізу перспективалары**

Мақалада Қазақстанның энергетикалық жүйесіне жоғары кернеулі тұрақты ток (HVDC) технологияларын енгізу перспективалары халықаралық тәжірибе мен заманауи техникалық шешімдерге сүйене отырып зерттеледі. HVDC жүйелерінің жұмыс істеу принциптері қарастырылады, оның ішінде айнымалы токты тиристорлық (LCC) және IGBT-преобразовательдері (VSC) арқылы тұрақты токқа түрлендіру, сондай-ақ олардың салыстырмалы сипаттамалары: тиімділік, реактивтік қуатты басқару, гармоникалық бұрмалану деңгейі және әртүрлі жұмыс жағдайларында қолданылу мүмкіндігі. Әлемдік HVDC желілерінің, әсіресе Қытай мен Үндістандағы дамуы талданады, онда  $\pm 1100$  кВ дейінгі кернеу деңгейлері мен 12 ГВт-тан асатын қуатты тасымалдау қарастырылады. Қазақстанда HVDC технологияларын енгізу қажеттілігі сенімділікті арттыруға, 1000 км-ге дейінгі қашықтықтағы желілердегі энергия шығынын азайтуға және 7 ГВт-тан асатын орнатылған қуаты бар жаңартылатын энергия көздерін интеграциялауға негізделген. Стратегиялық HVDC желілерінің бағыттары ұсынылған, оның ішінде Экибастұз–Алматы және Ақтөбе–Атырау бағыттары, сондай-ақ техникалық-экономикалық негіздемелер жасау және халықаралық ынтымақтастық шаралары қарастырылған.

*Түйінді сөздер:* HVDC, жоғары кернеулі тұрақты токты беру, VSC-преобразовательдер, LCC-преобразовательдер, Қазақстанның энергетикалық жүйесі, жаңартылатын энергия көздерін интеграциялау, электр энергиясының шығыны

A. V. Nikulshin, E. V. Kuntush

#### **«Prospects for the Implementation of HVDC Technologies in Kazakhstan's Power System Based on International Experience»**

The article explores the prospects of implementing high-voltage direct current (HVDC) transmission technologies into Kazakhstan's power system, drawing on international experience and modern technological solutions. The principles of HVDC systems operation are examined, including the conversion of alternating current to direct current using thyristor-based (LCC) and IGBT-based (VSC) converters, along with their comparative characteristics: efficiency, reactive power control, harmonic distortion levels, and applicability under various operating conditions. An analysis of global HVDC line development is presented, particularly in China and India, considering voltage levels up to  $\pm 1100$  kV and power transmission capacities exceeding 12 GW. The necessity of adopting HVDC in Kazakhstan is justified to enhance system reliability, reduce losses over transmission lines up to 1000 km long, and integrate renewable energy sources with an installed capacity of more than 7 GW. Strategic HVDC line routes are proposed, including the Ekibastuz–Almaty and Aktobe–Atyrau corridors, alongside measures for techno-economic feasibility studies and international cooperation.

*Keywords:* HVDC, high-voltage direct current transmission, VSC converters, LCC converters, Kazakhstan power system, renewable energy integration, electrical losses.

### **Раздел 3. «IT-технологии, энергетика, автоматизация и вычислительная техника»**

#### References

1. Albannai B. Comparative Study of HVAC and HVDC Transmission Systems with Proposed Machine Learning Algorithms for Fault Location Detection. M.Sc. Thesis, Arizona State University, USA, 2019.
2. Lackovic V. Principles of HVDC Transmission. Continuing Education and Development, Inc., USA, n.d. Available at: <https://www.cedengineering.com/userfiles/Principles%20of%20HVDC%20Transmission-R1.pdf> (Accessed: 03.04.2025).
3. Kalair A., Abas N., Khan N. Comparative Study of HVAC and HVDC Transmission Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59 (2016), pp. 1653–1675. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.288>
4. Shah Ayobe A., Gupta S. Comparative Investigation on HVDC and HVAC for Bulk Power Delivery. *Materials Today: Proceedings*, 49 (2022), pp. 2228–2236. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.025>
5. Pei Z., Liu P., Zhang A., Zhou Y. An Overview on VSC-HVDC Power Transmission Systems. *International Journal of Control and Automation*, 9(5) (2016), pp. 33–44. <https://doi.org/10.14257/ijca.2016.9.5.04>
6. Gandotra R., Kanika, Pal K. The VSC-HVDC Transmission System Performance Assessment. In: *Advancements & Key Challenges in Green Energy and Computing (AKGEC 2023)*, Journal of Physics: Conference Series, 2570 (2023), 012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2570/1/012025>
7. Jiang H., Fang J., Zhang T., Fan X. The Area Comparison of LCC-HVDC and VSC-HVDC. *Science Discovery*, 5(7) (2017), pp. 502–508. <https://doi.org/10.11648/j.sd.20170507.15>
8. PSMa Consulting. LCC HVDC vs VSC HVDC Transmission Systems. Available at: <https://www.psmiconsulting.com/power-system-studies/hvdc/lcc-hvdc-vs-vsc-hvdc-transmission-systems> (Accessed: 03.04.2025).
9. Aspinall N. *Electric Transmission: HVDC and Interconnectors*. Bloomberg New Energy Finance (BNEF), 2016.
10. Ardelean M., Minnebo P. *A China-EU Electricity Transmission Link: Assessment of Potential Connecting Countries and Routes*. EUR 29098 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017. <https://doi.org/10.2760/67516>
11. Mitra S., Pandaraboyana D.K., Arulvendhan K., Srinivasan J.D. HVDC in Indian Power Sector. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(1S4) (2019), pp. 509–514. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3345684>
12. Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan. Official Website. Available at: <https://www.gov.kz/memleket/entities/energo?lang=ru> (Accessed: 03.04.2025).