

# ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ) (2.4.3)



УДК 621.311

DOI: 10.24160/1993-6982-2022-5-20-29

## Технологическое присоединение электрической сети Сирии к сети DESERTEC

И. Алваза, М.В. Бурмейстер, Р.Р. Насыров

Технический прогресс ведет к увеличению потребления электрической энергии, что вынуждает страны обращаться к различным, в том числе возобновляемым, источникам энергии. Благодаря развитию возобновляемой энергетики в мире появилось несколько масштабных проектов по созданию глобальной энергетической системы, объединяющих ряд стран с электростанциями на основе возобновляемых источников энергии. Одним из них является DESERTEC. Цель проекта заключается в оптимизации использования возобновляемых источников энергии путем соединения стран Ближнего Востока, Северной Африки и Европы друг с другом с помощью передач постоянного тока высокого напряжения.

Представлены возможные варианты подключения электроэнергетической системы 400 кВ Сирийской Арабской Республики, работающей на переменном токе, к сети постоянного тока проекта DESERTEC. Рассмотрены типы преобразователей для применения на передачах постоянного тока, выявлены их достоинства и недостатки. Проведен расчёт электрических режимов в сетях постоянного и переменного тока, определены значения потерь активной мощности и падения напряжения при использовании униполярной и биполярной систем передачи постоянного тока. Сделаны выводы о влиянии подключения сети DESERTEC на системы Сирии. Установлены факторы, влияющие на выбор типа передачи постоянного тока.

*Ключевые слова:* передачи постоянного тока, LCC-HVDC, VSC-HVDC, MTDC, DESERTEC, возобновляемые источники энергии, Сирийская Арабская Республика.

*Для цитирования:* Алваза И., Бурмейстер М.В., Насыров Р.Р. Технологическое присоединение электрической сети Сирии к сети DESERTEC // Вестник МЭИ. 2022. № 5. С. 20—29. DOI: 10.24160/1993-6982-2022-5-20-29.

## Technological Connection of Syria's Electric Power System to the DESERTEC System

I. Alwazah, M.V. Burmeyster, R.R. Nasyrov

Technical progress leads to a growth of electricity consumption, due to which countries face the need to look for various sources of energy, including renewable ones. Owing to advances in the development of renewable energy, several large-scale projects have appeared in the world to build a global energy system uniting a number of countries with power plants based on renewable energy sources, DESERTEC being one of such projects. The aim of this project is to optimize the use of renewable energy sources by interconnecting the countries of Middle East, North Africa and Europe using HVDC power lines. The article presents possible options for connecting the Syrian Arab Republic's 400 kV AC electric power system to the DESERTEC project's HVDC grid. Various types of converters for use in HVDC power lines are considered, and their advantages and drawbacks are identified. Electrical operation modes in the DC and AC networks are analyzed, and the values of active power losses and voltage drops are determined for the cases of using unipolar and bipolar HVDC transmission systems. Conclusions about the effect the connection of Syrian systems to the DESERTEC network are drawn. The factors influencing the choice of the HVDC transmission type are determined.

*Key words:* HVDC transmissions, LCC-HVDC, VSC-HVDC, MTDC, DESERTEC, renewable energy sources, Syrian Arab Republic.

*For citation:* Alwazah I., Burmeyster M.V., Nasyrov R.R. Technological Connection of Syria's Electric Power System to the DESERTEC System. Bulletin of MPEI. 2022;5:20—29. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2022-5-20-29.

*Кафедре электроэнергетических систем НИУ «МЭИ» в 2022 г. исполняется 90 лет. В честь нашего юбилея мы публикуем статьи о результатах наших исследований. Данная статья является одной из них.*

## Введение

Говоря о будущем энергетики, нельзя не упомянуть о возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) и, в частности, об их использовании в производстве электроэнергии. Экономическая эффективность ВИЭ с каждым годом растет благодаря новым технологиям, увеличиваются инвестиции в этот сектор экономики. В некоторых случаях внедрение ВИЭ является единственной альтернативой из-за многочисленных технических, экономических и экологических ограничений, поэтому ряд стран Ближнего Востока (Сирия, Ливан, Египет, Иордания, Турция) стремятся их использовать. Несмотря на то, что большинство стран арабского региона считаются богатейшими по запасам ископаемого топлива (на их долю приходится 58% мировых запасов нефти и 26% запасов природного газа), в регионе наблюдается значительное увеличение спроса на энергоресурсы, особенно на электроэнергию. Ожидаемый рост спроса — на 7% в течение следующих нескольких лет. На данный момент в арабских странах 98,2% производства энергии приходится на нефть и природный газ, они полностью зависимы от данных ресурсов, что ведет к их скорому истощению [1]. Необходима диверсификация энергетических рисков. Таким образом, арабский регион нуждается в ВИЭ, к тому же это внесет значительный вклад в снижение воздействия на окружающую среду и концентрации парниковых газов.

Согласно отчету TREC (транснациональный кластер ВИЭ) [1], за шесть часов пустыни планеты получают от солнца достаточное количество энергии для покрытия годового потребления электроэнергии человечества. Именно это способствовало появлению амбициозных проектов, таких как DESERTEC и GOBITEC. Немецкий космический центр (DLR) заявил, что можно обеспечить электроэнергией большую часть мира, используя ВИЭ, так как заполнение 1% пустынь солнечными панелями достаточно для покрытия мирового годового потребления электроэнергии [1].

Цель проекта DESERTEC — выработка электроэнергии из чистых источников энергии и использование ВИЭ, присутствующих в каждом из регионов проекта [2]:

- ветроэнергетика: Исландия, Балтика, северо-западное побережье Африки и побережье Западной Европы;
- солнечная энергия: пустыня Сахара, Ближний Восток, Северная Африка и Европейские области с достаточной интенсивностью солнечного излучения;
- гидроэнергетика: водотоки горных регионов Северной Европы;
- энергия биомассы: районы избыточного сельскохозяйственного производства Центральной Европы, Польши и Прибалтики;
- геотермальная энергия: районы, подходящие для использования тепла земли — Италия, Франция, Литва.

Проект DESERTEC планировалось реализовать в четыре этапа. Изначально он должен был начинаться в 2020 г. и завершиться в 2050 г., но из-за политической нестабильности на Ближнем Востоке и в Северной Африке начало проекта было отложено на неопределенный срок. На рисунке 1 приведен план проекта DESERTEC до 2050 г. с распределением ВИЭ и указанием объемов через межсистемные перетоки по высоковольтным линиям постоянного тока (HVDC).

Переток энергии между Сирией и Турцией колеблется в пределах 50...100 ТВт·ч в год. Переток в доминирующем направлении составляет 50...60% времени использования электропередачи [3]. Переток энергии между Сирией и Иорданией находится в диапазоне 50...100 ТВт·ч, а переток в доминирующем направлении составляет 80...100% времени. Что касается Ливана, то поток энергии с Сирией составляет около 1...25 ТВт·ч, электроэнергия передается в одном направлении 80...100% времени в год [3].

## Типы преобразователей для электропередачи постоянного тока HVDC

Переменный ток занимает доминирующее положение в областях производства, передачи и распределения электроэнергии. Однако системы переменного тока обладают некоторыми недостатками: передача энергии на большие расстояния (более 1500 км), передача больших мощностей по кабелю, объединение систем с двумя разными частотами и др. Решить их позволяет использование передачи постоянного тока — HVDC [4]. В системах передач постоянного тока (ППТ) используется одна из двух технологий преобразований тока — LCC (Line-commutated Current) и VSC (Voltage Source Converter). Технология LCC–HVDC построена на применении тиристоров. Она появилась в 1960-х гг. и с тех пор широко использовалась до введения технологии VSC–HVDC. Данная технология разработана на базе IGBT (биполярных транзисторов с изолированным затвором) или GTO (запираемых тиристоров). В литературе отмечается, что VSC–HVDC более просты в эксплуатации, а также обладают рядом преимуществ перед LCC–HVDC [5 — 9]:

- используются ключи, пропускающие ток в двух направлениях;
- направление передаваемой активной и реактивной мощности может быть изменено;
- требуются меньшие мощности фильтров для устранения гармоник на сторонах переменного и постоянного токов, соответственно снижаются на 50...60% площади для размещения фильтров [10];
- реализована возможность независимого управления активной и реактивной мощностями [11];
- доступны питание пассивных сетей (без источника генерации) и восстановление энергосистемы в состоянии отключения;
- введен отбор мощности от ППТ (англ. MTDC — Multi-terminal Direct Current).

На рисунках 2, 3 показаны принципиальные схемы электропередачи постоянного тока с преобразователями LCC и VSC HVDC.

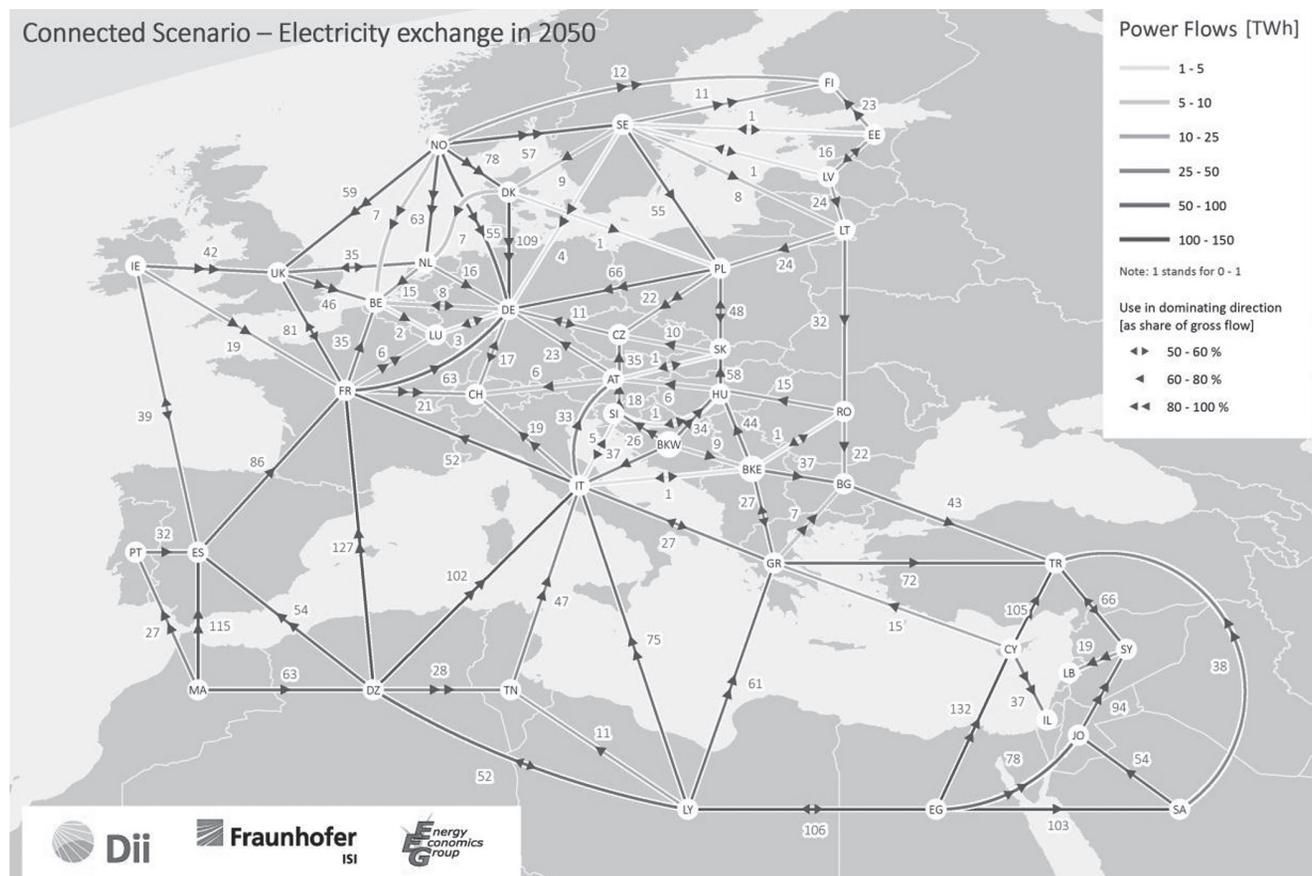


Рис. 1. План проекта DESERTEC с распределением ВИЭ в странах Европы, Северной Африки и Ближнего Востока до 2050 г.

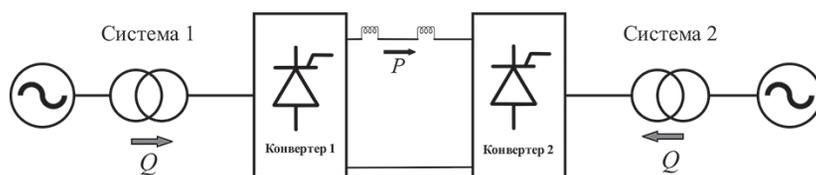


Рис. 2. Принципиальная схема преобразователей LCC-HVDC

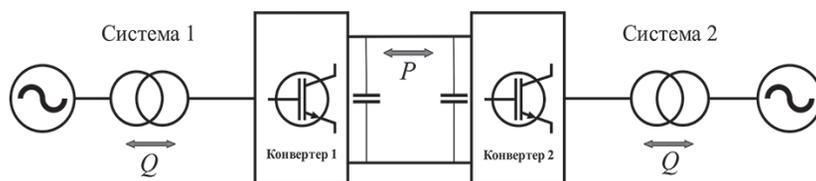


Рис. 3. Принципиальная схема преобразователей VSC-HVDC

В VSC в качестве ключей добавлены IGBT-транзисторы, для управления которыми используется широтно-импульсная модуляция. Это обеспечивает возможность задания токов и напряжений произвольной формы и фазового угла [11].

**Типы систем MTDC**

Изначально ППТ (HVDC) служили для передачи электроэнергии между двумя подстанциями. С развитием технологий появилась возможность промежуточного

отбора мощности с них, что позволило подключить несколько преобразовательных подстанций (терминалов) и расширить функционал управления системой электропитания [12, 13]. Системы MTDC делят на последовательные и параллельные системы, которые, в свою очередь, разветвляются на радиальные и кольцевые [14].

*Последовательная система MTDC.*

На рисунке 4 изображена униполярная ППТ с промежуточным отбором мощности. Расположение точ-

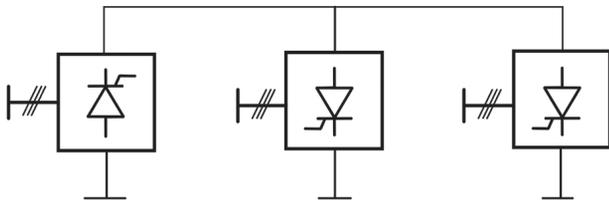


Рис. 4. Принципиальная схема последовательной системы MTDC

ки заземления определяется, исходя из условий эксплуатации системы. Ток в ППТ поддерживается на неизменном уровне одной из преобразовательных подстанций и является общим для всех остальных преобразовательных подстанций в составе ППТ.

Величиной угла срабатывания вентиля можно управлять, чтобы контролировать реактивную мощность системы, а также величину потерь в ключах. На постоянной основе общее напряжение на выпрямительных станциях должно быть больше, чем общее напряжение на инверторных станциях, и в случае неисправности в электрической системе, которая приводит к снижению напряжения на выпрямительных станциях, эталонный инвертор будет выполнять задачу управления.

*Параллельная система MTDC.*

На рисунках 5 и 6 продемонстрированы радиальная система с 3-мя преобразовательными подстанциями и кольцевая система с 4-мя ПС. В радиальной системе одна из станций в системе опорная по напряжению, т. е. должно выполняться одно из двух условий: постоянный модуль напряжения или фаза.

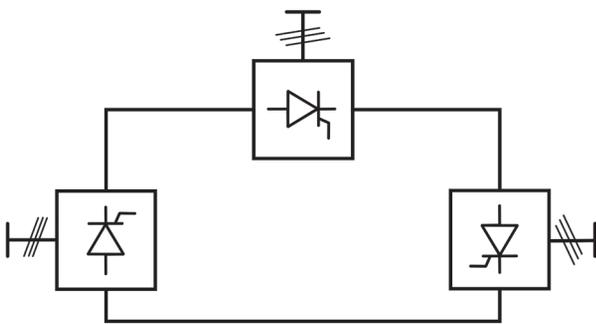


Рис. 5. Принципиальная схема радиальной параллельной системы MTDC

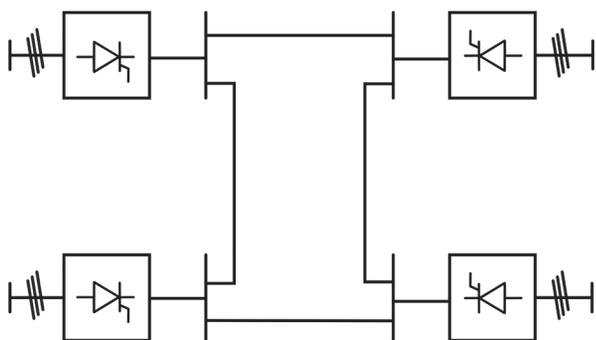


Рис. 6. Принципиальная схема кольцевой параллельной системы MTDC

Основное различие между двумя типами заключается в том, что кольцевая система более надежна, чем радиальная, потому что в случае потери одной из линий в радиальной системе это приводит к прерыванию потока энергии в других частях системы. В то время как в кольцевой системе при потере линии оставшаяся часть системы продолжает питаться по другим линиям при условии, что они имеют достаточную пропускную способность.

Аналогично, потеря одного из мостов преобразователя в кольцевых системах ведет к разделению мостов на других станциях или, как минимум, к разделению затронутой станции (в соответствии с используемой системой защиты).

*Сравнение последовательного и параллельного MTDC.*

Последовательное и параллельное соединения имеют свои достоинства и недостатки, которые следует учитывать для развития ППТ в будущем. Приведем основные из них [15]:

- в последовательных системах энергию можно быстро реверсировать без механического переключения, что нереализуемо в параллельных системах;
- в последовательной системе с номинальной мощностью преобразователя связано номинальное напряжение вентиля, в то время как в параллельной системе с номинальной мощностью связан номинальный ток, следовательно, последовательное подключение дешевле параллельного при меньшей мощности из-за сниженного класса изоляции на преобразователе. Важной особенностью параллельного подключения является возможность его дальнейшего расширения путем добавления преобразователей параллельно с системой;
- изменение напряжения вдоль линии в последовательных системах вызывает проблему координации изоляции;
- в последовательных системах потери электроэнергии выше;
- неисправность в последовательных системах ведет к полному отключению системы, в то время как неисправность в параллельных системах — к отключению преобразовательной станции, на которой произошел сбой.

**Математическая модель сетей переменного и постоянного тока**

*Модель сети постоянного тока.*

Переток в сети постоянного тока имеет много общего с перетоком в обычной сети переменного тока. Для сети постоянного тока из  $n$  узлов матрицу проводимости  $G_{DC}$  можно представить в следующем виде:

$$G_{DC} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \dots & G_{nn} \end{bmatrix};$$

$$G_{DCij} = \sum_{j=1}^n g_{ij}, \quad G_{DCij} = -g_{ij}, \quad i \neq j,$$

где  $G_{DCij}$  — проводимость между шинами постоянного тока  $i$  и  $j$ .

Суммарные токи в сети постоянного тока для всех  $n$  шин запишем в матричном виде:

$$I_{DC} = G_{DC} U_{DC};$$

$$I_{DC} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n G_{DC,ij} (U_{DC,i} - U_{DC,j}),$$

где

$$U_{DC} = [U_{DC1}, U_{DC2}, \dots, U_{DCn}]^T, \quad I_{DC} = [I_{DC1}, I_{DC2}, \dots, I_{DCn}]^T$$

— векторы постоянных напряжения и тока.

Для сети постоянного тока загрузку по активной мощности  $P_{DC,i}$  в узле  $i$  в установившемся режиме можно рассчитать с помощью следующих уравнений:

$$P_{DC,i} = p U_{DC,i} I_{DC,i}; \quad \forall i \leq k;$$

$$P_{DC,i} = p U_{DC,i} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n G_{DC,ij} (U_{DC,i} - U_{DC,j}),$$

где  $p$  определяет топологию сети постоянного тока;  $p = 1$  используется для униполярной топологии, а  $p = 2$  — для биполярной топологии.

*Переток в сети переменного тока.*

Уравнения перетока активной и реактивной мощностей для сети переменного тока представим в виде:

$$P_i(U, \delta) = U_i \sum_{j=1}^m U_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)];$$

$$Q_i(U, \delta) = U_i \sum_{j=1}^m U_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)].$$

где  $m$  — общее количество сетевых шин переменного тока.

Традиционный алгоритм расчета режима в небалансах мощности Ньютона–Рафсона необходим для определения напряжений и фазовых углов для всех шин переменного тока с использованием:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(k+1)} \\ \frac{\Delta U^{(k+1)}}{U} \end{bmatrix} = -[J^{(k)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix},$$

где  $\Delta \delta^{(k+1)}$ ,  $\Delta U^{(k+1)}$  — приращения неизвестных угла и модуля напряжения на  $(k+1)$ -й итерации;  $[J^{(k)}]^{-1}$  — обращенная матрица Якоби;  $\Delta P^{(k)}$ ,  $\Delta Q^{(k)}$  — небалансы активной и реактивной мощностей на  $k$ -й итерации; верхний индекс  $k$  — номер итерации расчета неизвестных в сетях переменного/постоянного тока.

*Преобразователь и (распределенные энергетические ресурсы) мощность и потери.*

С целью расширения алгоритма расчета для размещения преобразовательной станции VSC и распре-

деленных энергетических ресурсов в сети переменного тока вводы мощности преобразователя  $P_{AC,i}$  и  $Q_{AC,i}$  включены в векторы небалансов мощности как отрицательные нагрузки. Аналогично, для распределенных энергетических ресурсов уравнения небалансов могут быть смоделированы как:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{\text{ген}} - P_i^{\text{нар}} - P_i(U, \delta) + P_{AC,i};$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{\text{ген}} - Q_i^{\text{нар}} - Q_i(U, \delta) + Q_{AC,i}.$$

$P_i^{\text{ген}}$  &  $Q_i^{\text{ген}}$ : генерация активной и реактивной мощностей из распределенных энергетических ресурсов;

$P_i^{\text{нар}}$  &  $Q_i^{\text{нар}}$ : нагрузка, подключенная к шинам;

$P_{AC,i}$  &  $Q_{AC,i}$ : ввод активной и реактивной мощностей преобразователями;

$P_i(U, \delta)$  &  $Q_i(U, \delta)$ : активная и реактивная мощности перетоков в сети переменного тока.

После расчета в сети переменного тока найдем значения напряжения сети переменного тока  $U_{AC,i}$  активной  $P_{AC,i}$  и реактивной  $Q_{AC,i}$  мощностей, а также потери  $P_{\text{loss}}$  для получения ввода мощности в сеть постоянного тока:

$$P_{DC,i} = -P_{AC,i} - P_{\text{потерь},i} \quad \forall i \leq n.$$

*Поток нагрузки сети постоянного тока.*

После расчета в сети переменного тока получим мощность постоянного тока  $P_{DC}$ :

$$P_{DC,i} = p U_{DC,i} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n G_{DC,ij} (U_{DC,i} - U_{DC,j}).$$

Используя вектор ввода мощности постоянного тока, вычислим вектор небаланса мощности  $\Delta P_{DC}$  методом Ньютона–Рафсона NR:

$$\left[ U_{DC} \frac{\partial P_{DC}}{\partial U_{DC}} \right]^{(j)} \frac{\Delta U_{DC}^{(j)}}{U_{DC}} = \Delta P_{DC}^{(j)}.$$

Для режима преобразователя с управлением  $P_{AC}$  значение  $\Delta P_{DC}^{(j)}$  принимается как  $\Delta P_{DC}^{(k)} - P_{DC,i} \left( U_{DC}^{(j)} \right)$ , в то время как в случае отключения преобразователя оно равно  $-P_{DC,i} \left( U_{DC}^{(j)} \right)$ . Надстрочные индексы  $j$  относятся к итерациям при расчете небаланса внутренней шины постоянного тока.

### Результаты моделирования и обсуждение

Выполнено моделирование присоединения электрической сети 400 кВ Сирийской Арабской Республики к проекту DESERTEC. Для первого этапа проекта выбрана система радиальных ответвлений MTDC на основе преобразователей VSC. На рисунке 7 изображена топологическая схема соединения энергосистем Сирии и DESERTEC [16].

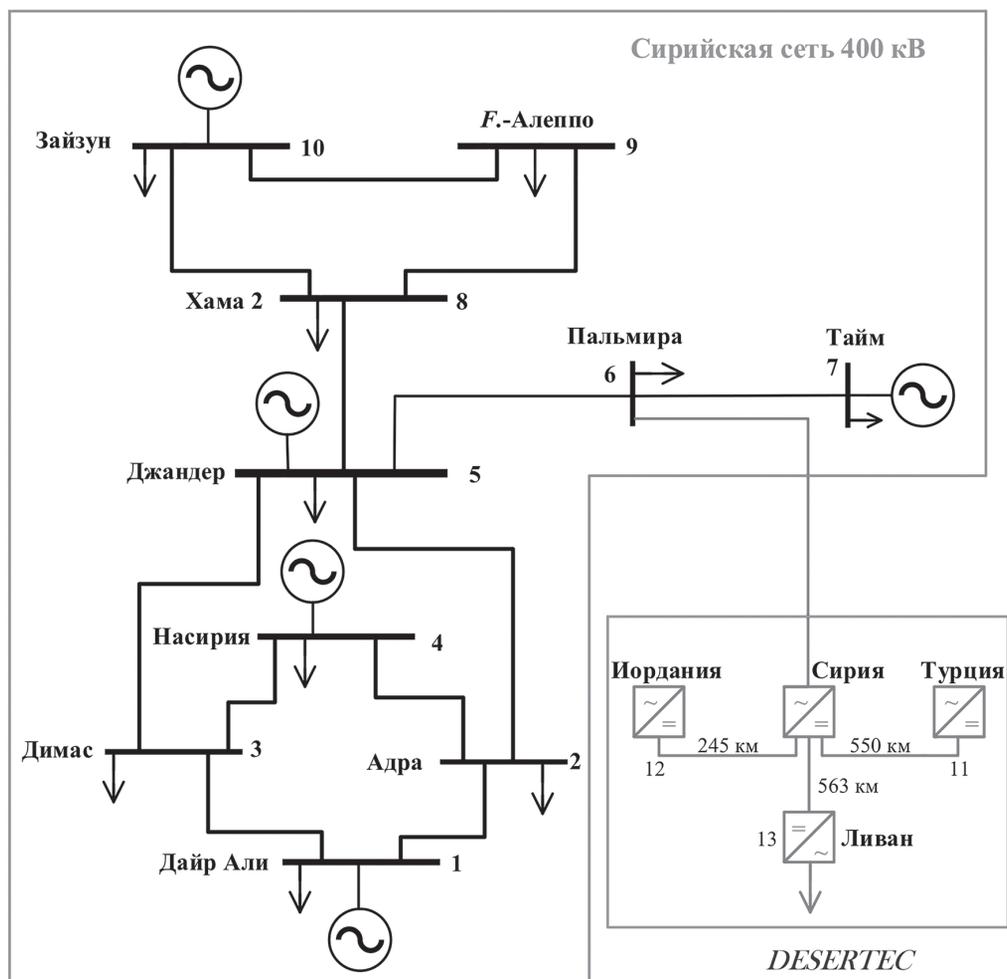


Рис. 7. Топологическая схема подключения энергосистемы Сирии к сети DESERTEC

Для подключения к стороне постоянного тока взята параллельная система MTDC, поскольку это позволит решить проблему координации изоляции и в дальнейшем поспособствует расширению системы.

Проведено сравнение между использованием униполярной и биполярной сетевых систем для подключения к сети DESERTEC. Для этого использован пакет MatACDC для расчёта установившихся режимов в системах переменного и постоянного токов, работающий на основе Matlab. Программа делает последовательный расчёт перетоков мощности отдельно для постоянного и переменного токов, т. е. во время расчёта системы постоянного тока сторона переменного тока считается неизменной и наоборот. Ее можно использовать для моделирования взаимосвязанных систем переменного тока и многополюсных преобразователей VSC-HVDC [16]. В сети DESERTEC выбран класс номинального напряжения 500 кВ.

На основе плана [17], представленного Министерством энергетики Сирии в 2010 г. (независимо от состояния войны), принято во внимание будущее развитие сирийской электрической сети до 2030 г. План предусматривает, что количество импортируемой энергии

(из стран, связанных с восьмью проектами межсистемного взаимодействия) составляет около 1220 ГВт·ч к 2025 г., а экспортируемой — 1970 ГВт·ч. В 2019 г. был разработан план использования возобновляемых источников энергии и выработки мощности в 2400 МВт до 2030 г. [1, 18]. В результате войны электрическая нагрузка в Сирийской Арабской Республике снизилась, поэтому произведенной энергии больше, чем потребляется при работе всех электростанций. По оперативным данным проекта DESERTEC на первом этапе энергообмен с Сирией и соседними странами должен составлять от 1 до 5 ТВт·ч в год, что позволяет подключиться к сирийской сети и обеспечить необходимый переток мощности. В таблице 1 показан переток в основных линиях сети 400 кВ в Сирийской Арабской Республике [17].

Согласно отчетам сирийского министерства электроэнергетики кривая спроса на энергию в пиковый день показывает, что максимальная потребляемая мощность наблюдается в 18:00 и составляет 9666 МВт, а потребление с 14:00 до 22:00 колеблется в интервале от 9000 до 9666 МВт [19]. Связь с DESERTEC составляет око-

Таблица 1

## Перетоки активной мощности на главных ЛЭП 400 кВ

Наименование ЛЭП	Переток, МВт
Дер Али–Адра	195
Дер Али–Димас	315
Адра–Джандер	89
Адра–Насрье	30
Димас–Насирия	22
Димас–Джандер	98
Джандер–Пальмира	161
Пальмира–Алтайем	155
Джандер–Хама2	65
Хама2–Ф.-Алеппо	40
Хама2–Зайзун	101
Зайзун–Ф.-Алеппо	105

ло 16 ч в сутки. На первом этапе подключения Сирии к DESERTEC смоделировано подключение 500 МВт мощности.

В таблице 2 представлена разница между значениями напряжения на шинах 400 кВ в относительных единицах от номинального в случаях до подключения сирийской сети к DESERTEC и при подключения к ней при функционировании униполярной и биполяр-

ной систем МТДС. Подключение сирийской сети к DESERTEC выполнено на шине № 6.

В таблице 3 значения напряжений на шинах постоянного тока представлены при работе униполярной и биполярной ППТ.

В таблице 4 приведены значения напряжения на шинах переменного тока преобразовательных подстанций.

В таблице 5 указаны потери мощности в ветвях постоянного тока для униполярной и биполярной ППТ.

При сравнении результатов двух систем получено, что потери в линиях в униполярной ППТ (500 кВ) составляют около 11% передаваемой мощности, а в биполярной системе ( $\pm 500$  кВ) — 4,8%. Падение напряжения на шинах № 11 и 13 в униполярной ППТ составляет 14%, а в биполярной не превышает 7%. Поскольку количество энергии, передаваемой в системе МТДС, варьируется в зависимости от условий эксплуатации системы, биполярная система более гибкая и надежная, чем униполярная.

Все предшествующие исследования в области передачи электроэнергии с использованием постоянного тока не затрагивали выбор однозначно лучшего варианта подключения стран к единой сети постоянного тока, а ограничивались решением определенных задач.

Проанализированы результаты использования двух типов ППТ (униполярной и биполярной), применяемых в системах постоянного тока в сирийской сети

Таблица 2

## Значения напряжения на шине переменного тока 400 кВ до и после подключения сирийской сети к DESERTEC

Номер шины	Напряжение без DESERTEC, о.е.	Напряжение с DESERTEC, о.е.	
		униполярная ППТ	биполярная ППТ
1	1,000	1,000	1,000
2	0,993	0,996	0,996
3	0,993	0,994	0,994
4	1,000	1,000	1,000
5	1,000	1,000	1,000
6	0,983	0,967	0,969
7	1,000	1,000	1,000
8	1,001	1,001	1,001
9	1,003	1,003	1,003
10	1,000	1,000	1,000

Таблица 3

## Значения напряжения на шине переменного тока 400 кВ до и после подключения сирийской сети к DESERTEC

Номер шины DC	Напряжение с DESERTEC, о.е.	
	униполярная ППТ	биполярная ППТ
6	1,000	1,000
11	0,865	0,938
12	0,945	0,973
13	0,862	0,936

Таблица 4

Значения переменного напряжения в относительных единицах на шинах переменного тока преобразовательных подстанций в сети DESERTEC

Номер шины АС	Преобразователь напряжения (униполярная ППТ)		Потери активной мощности, МВт	Преобразователь напряжения (биполярная ППТ)		Потери активной мощности, МВт
	U, о.е.	Фаза, °		U, о.е.	Фаза, °	
6	0,967	-7,216	3,41	0,968	-6,281	3,15
11	0,999	0,594	1,36	0,999	0,594	1,36
12	0,995	2,580	1,36	0,995	2,701	1,36
13	0,993	4,322	1,36	0,993	4,407	1,36

Таблица 5

Потери мощности в ветвях постоянного тока для униполярной и биполярной ППТ

Название ППТ	Номер узла		Потери, МВт	
	начало	конец	униполярная ППТ	биполярная ППТ
Сирия–Турция	6	11	23,54	10,02
Сирия–Иордания	6	12	8,79	4,14
Сирия–Ливан	6	13	24,30	10,29

400 кВ. Выбор способа объединения постоянной и переменной частей энергосистемы — важный этап для начала комплексных исследований, связанных с алгоритмами работы и управления для мультитерминалов систем постоянного тока.

### Заключение

В связи с постоянным ростом спроса на энергию во всем мире и, в частности, в Сирийской Арабской республике, рождается множество планов по развитию энергетической инфраструктуры. Что касается DESERTEC, то каждая из стран-участниц проекта должна знать возможности технического присоединения своей национальной энергосистемы к общей системе DESERTEC.

### Литература

1. Calzadilla A., Wiebelt M., Blohmke J. Desert Power 2050: Regional and Sectoral Impacts of Renewable Electricity Production in Europe, the Middle East and North Africa. Kiel Working Papers, 2014.
2. Pavlík M., Zbojovský J., German-Sobek M. Vision of the Project DESERTEC // Renewable Energy Sources. 2012. Pp. 19—22.
3. Bartolot J e. a. DESERT Power: Getting Started [Электрон. ресурс] [www.dii-desertenergy.org/wp-content/uploads/2016/12/Desert-Power-Getting-Started-Full-Report-English-Screen1.pdf](http://www.dii-desertenergy.org/wp-content/uploads/2016/12/Desert-Power-Getting-Started-Full-Report-English-Screen1.pdf) (дата обращения 20.01.2022).
4. AG Siemens. HVDC. High Voltage Direct Current Transmission often is the Best Strategy [Электрон. ресурс] [www.brown.edu/Departments/Engineering/Courses/ENGN1931F/HVDC\\_Proven\\_TechnologySiemens.pdf](http://www.brown.edu/Departments/Engineering/Courses/ENGN1931F/HVDC_Proven_TechnologySiemens.pdf) (дата обращения 20.01.2022).

Изучена возможность передачи 500 МВт мощности из сирийской сети в DESERTEC. В программном комплексе MatACDC смоделированы часть сети DESERTEC, состоящая из 4-х преобразовательных подстанций, и энергосистема Сирии. Рассмотрено два варианта соединения систем с помощью униполярной и биполярной ППТ. Расчёты показали, что использование биполярной ППТ для передачи одной и той же мощности дает меньшие потери электроэнергии и падения напряжения в сети по сравнению с униполярной ППТ. Расчёт электрического режима в энергосистеме Сирии продемонстрировал, что присоединение к сети DESERTEC слабо влияет на уровни напряжений в узлах системы, наибольшее отклонение напряжения составляет 1,7% от исходного в точке присоединения к DESERTEC.

### References

1. Calzadilla A., Wiebelt M., Blohmke J. Desert Power 2050: Regional and Sectoral Impacts of Renewable Electricity Production in Europe, the Middle East and North Africa. Kiel Working Papers, 2014.
2. Pavlík M., Zbojovský J., German-Sobek M. Vision of the Project DESERTEC. Renewable Energy Sources. 2012:19—22.
3. Bartolot J e. a. DESERT Power: Getting Started [Elektron. Resurs] [www.dii-desertenergy.org/wp-content/uploads/2016/12/Desert-Power-Getting-Started-Full-Report-English-Screen1.pdf](http://www.dii-desertenergy.org/wp-content/uploads/2016/12/Desert-Power-Getting-Started-Full-Report-English-Screen1.pdf) (Data Obrashcheniya 20.01.2022).
4. AG Siemens. HVDC. High Voltage Direct Current Transmission often is the Best Strategy [Elektron. Resurs] [www.brown.edu/Departments/Engineering/Courses/ENGN191F/HVDC\\_Proven\\_TechnologySiemens.pdf](http://www.brown.edu/Departments/Engineering/Courses/ENGN191F/HVDC_Proven_TechnologySiemens.pdf) (Data Obrashcheniya 20.01.2022).

5. **Akkari S.** Control of a Multi-terminal HVDC (MTDC) System and Study of Its Interactions with the AC Grids. Thèse de Doctorat De l' Université Paris-Saclay Préparée à l' École CentraleSupélec, 2016. Pp. 15—26.
6. **Mukhedkar R.** Introduction to HVDC LCC & VSC – Comparison HVDC Converter Technology. South Asia Reg. Initiat. Energy Integr., 2010. Pp. 1—9.
7. **Akerberg M.** Comparison of HVDC Light (VSC) and HVDC Classic (LCC) Site Aspects, for a 500MW 400kV HVDC Transmission Scheme // Proc. IET ACDC Conf. 2012. Pp. 1—6.
8. **Padiyar K.** Multiterminal and Multi-infeed DC Systems. New Delhi: New Age Intern. Ltd. Publ., 2015. Pp. 204—218.
9. **Nasyrov R., Alwazah I., Aljendy R.** Solving Problem of Electric Power Shortage Using HVDC // Proc. Intern. Ural Conf. Electrical Power Eng. 2019. Pp. 203—207.
10. **Pinto R.** Multi-terminal DC Networks System Integration, Dynamics and Control // Engenheiro Eletricista, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Laurea Specialistica in Ingegneria Elettrica. Politecnico di Torino geboren te São Paulo, 2014. Pp. 15—38.
11. **Wang F., Bertling L., Le T.** An Overview Introduction of VSC-HVDC: State-of-art and Potential Applications in Electric Power Systems // Proc. CIGRE Symp. Electr. Power Syst. Futur. Integr. Supergrids Microgrids. 2011. Pp. 1—6.
12. **Björk J., Johansson K., Harnefors L.** Analysis of Coordinated HVDC Control for Power Oscillation Damping // Proc. Conf. Rec 3<sup>rd</sup> IEEE Int. Work Electron Power Grid, eGrid, 2018. Pp. 1—6.
13. **Alwazah I., Nasyrov R., Shaban F.** The Importance of Grounding in HVDC Power Transmission Systems // Proc. International Ural Conf. Electrical Power Eng. 2020. Pp. 131—135.
14. **Buigues G. e. a.** Present and Future Multiterminal HVDC systems: Current Status and Forthcoming Developments. Renew Energy Power Qual., 2017. Pp. 83—88.
15. **Nazari M.** Control of DC Voltage in Multi-terminal HVDC Transmission (MTDC) Systems. Stockholm: Licentiate Thesis in Electrical Eng., 2014.
16. **Alwazah I., Nasyrov R., Aljendy R.** Analysis of the Performance of Syrian 400 kV Electrical Network // Proc. International Ural Conf. Electrical Power Eng. 2020. Pp. 200—204.
17. **Tiara D., Muhammad A., Masruhim R.** Study for Updating Syrian Electricity Sector in Syrian Arab Republic. Lab Penelit dan Pengemb FARMAKA Trop Fak. Farm Univ., 2016. Pp. 5—24.
18. **Public** Establishment of Electricity for Generation. Syrian Ministry of Electricity, 2017 [Электрон. ресурс] [www.eib.org/attachments/pipeline/20080244\\_eia\\_en.pdf](http://www.eib.org/attachments/pipeline/20080244_eia_en.pdf) (дата обращения 20.01.2022).
19. **ПЕТЕ.** Syrian Ministry of Electricity. General Electricity Transmission Corporation, 2016.
5. **Akkari S.** Control of a Multi-terminal HVDC (MTDC) System and Study of Its Interactions with the AC Grids. Thèse de Doctorat De l' Université Paris-Saclay Préparée à l' École CentraleSupélec, 2016:15—26.
6. **Mukhedkar R.** Introduction to HVDC LCC & VSC – Comparison HVDC Converter Technology. South Asia Reg. Initiat. Energy Integr., 2010:1—9.
7. **Akerberg M.** Comparison of HVDC Light (VSC) and HVDC Classic (LCC) Site Aspects, for a 500MW 400kV HVDC Transmission Scheme. Proc. IET ACDC Conf. 2012:1—6.
8. **Padiyar K.** Multiterminal and Multi-infeed DC Systems. New Delhi: New Age Intern. Ltd. Publ., 2015:204—218.
9. **Nasyrov R., Alwazah I., Aljendy R.** Solving Problem of Electric Power Shortage Using HVDC. Proc. Intern. Ural Conf. Electrical Power Eng. 2019:203—207.
10. **Pinto R.** Multi-terminal DC Networks System Integration, Dynamics and Control. Engenheiro Eletricista, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Laurea Specialistica in Ingegneria Elettrica. Politecnico di Torino geboren te São Paulo, 2014:15—38.
11. **Wang F., Bertling L., Le T.** An Overview Introduction of VSC-HVDC: State-of-art and Potential Applications in Electric Power Systems. Proc. CIGRE Symp. Electr. Power Syst. Futur. Integr. Supergrids Microgrids. 2011:1—6.
12. **Björk J., Johansson K., Harnefors L.** Analysis of Coordinated HVDC Control for Power Oscillation Damping. Proc. Conf. Rec 3<sup>rd</sup> IEEE Int. Work Electron Power Grid, eGrid, 2018:1—6.
13. **Alwazah I., Nasyrov R., Shaban F.** The Importance of Grounding in HVDC Power Transmission Systems. Proc. International Ural Conf. Electrical Power Eng. 2020:131—135.
14. **Buigues G. e. a.** Present and Future Multiterminal HVDC systems: Current Status and Forthcoming Developments. Renew Energy Power Qual., 2017:83—88.
15. **Nazari M.** Control of DC Voltage in Multi-terminal HVDC Transmission (MTDC) Systems. Stockholm: Licentiate Thesis in Electrical Eng., 2014.
16. **Alwazah I., Nasyrov R., Aljendy R.** Analysis of the Performance of Syrian 400 kV Electrical Network. Proc. International Ural Conf. Electrical Power Eng. 2020:200—204.
17. **Tiara D., Muhammad A., Masruhim R.** Study for Updating Syrian Electricity Sector in Syrian Arab Republic. Lab Penelit dan Pengemb FARMAKA Trop Fak. Farm Univ., 2016:5—24.
18. **Public** Establishment of Electricity for Generation. Syrian Ministry of Electricity, 2017 [Elektron. Resurs] [www.eib.org/attachments/pipeline/20080244\\_eia\\_en.pdf](http://www.eib.org/attachments/pipeline/20080244_eia_en.pdf) (Data Obrashcheniya 20.01.2022).
19. **ПЕТЕ.** Syrian Ministry of Electricity. General Electricity Transmission Corporation, 2016.

**Сведения об авторах:**

**Алваза Ибрагим** — аспирант кафедры электроэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: alwazah.ibrahim@gmail.com

**Бурмейстер Максим Витальевич** — ассистент кафедры электроэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: max.burmeyster@gmail.com

**Насыров Ринат Ришатович** — кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: nasirov.rinat@gmail.com

**Information about authors:**

**Alwazah Ibrahim** — Ph.D.-student of Electric Power Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: alwazah.ibrahim@gmail.com

**Burmeyster Maksim V.** — Assistant of Electric Power Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: max.burmeyster@gmail.com

**Nasyrov Rinat R.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electric Power Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: nasirov.rinat@gmail.com

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 22.02.2022

**The article received to the editor:** 22.02.2022