

EDN: CXSQK

УДК 621.3.051.024

Influence of DC Line Resistance on Power Balance Distribution in Multi-Terminal Electrical Complexes

Maisam Ibrahim and Vasily I. Pantelev*

*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 07.03.2023, received in revised form 10.04.2023, accepted 10.08.2023

Abstract. This article discusses the impact of direct current resistance on the distribution of the power of the DC power system of the MPPT when stabilizing direct current voltage. The resistance of the DC line in the multi-terminal MTDC system leads to changes in the voltage on the direct current with a change in power flow in the system. This, in turn, affects the distribution of instant power balance in the MTDC system during control in order to stabilize direct current voltage. The values of the direct current voltage reinforcement values determine the degree of influence of a reduction in direct current on the distribution of power balance in the DC system. In this article, a mathematical model was obtained to assess the distribution of power balance, taking into account the effect of direct current resistance. The MTDC system with five VSC-HVDC terminals was modeled in the Matlab/Simulink software package to demonstrate the impact of direct current resistance on the distribution of power balance, as well as to check the proposed mathematical model, which evaluates the distribution of power balance.

Keywords: MTDC system, multi-terminal VSC-HVDC, line resistance, power flow, power balance, voltage droop, voltage stabilization.

Citation: Ibrahim, M., Pantelev, V. I. Influence of DC line resistance on power balance distribution in multi-terminal electrical complexes. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2023, 16(6), 728–742. EDN: CXSQK



Влияние сопротивления линий постоянного тока на распределение баланса мощности в многотерминальных электротехнических комплексах

М. Ибрагим, В. И. Пантелеев
*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. В этой статье обсуждается влияние сопротивления линии постоянного тока на распределение баланса мощности системы постоянного тока МППТ при стабилизации напряжения постоянного тока. Сопротивление линии постоянного тока в многотерминальной системе МППТ приводит к изменениям напряжения на шине постоянного тока при изменении потока мощности в системе. Это, в свою очередь, влияет на распределение мгновенного баланса мощности в системе МППТ при управлении с целью стабилизации напряжения постоянного тока. Значения коэффициента усиления напряжения постоянного тока определяют степень влияния снижения напряжения постоянного тока на распределение баланса мощности в системе постоянного тока. В данной статье получена математическая модель для оценки распределения баланса мощности с учетом влияния сопротивления постоянного тока. Система МППТ с пятью терминалами ПИН-ВППТ была смоделирована в программном пакете Matlab/Simulink для демонстрации влияния сопротивления линии постоянного тока на распределение баланса мощности, а также для проверки предложенной математической модели, которая оценивает распределение баланса мощности.

Ключевые слова: система МППТ, многотерминальный ПИН-ВППТ, сопротивление линии, поток мощности, баланс мощности, снижение напряжения, стабилизация напряжения.

Цитирование: Ибрагим М. Влияние сопротивления линий постоянного тока на распределение баланса мощности в многотерминальных электротехнических комплексах / М. Ибрагим, В. И. Пантелеев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(6). С. 728–742. EDN: CXSQQK

Сокращения:

МППТ – многотерминальная электропередача постоянного тока (MTDC);

ПИН – преобразователь источника напряжения (VSC);

ВППТ – высоковольтная передача постоянного тока (HVDC).

Введение

Преимущества многотерминальных систем передачи электроэнергии постоянного тока МППТ состоят в более низких потерях при передаче, обеспечиваемой гибкости управления, возможности подключения асинхронных сетей и в простоте включения новых терминалов ПИН-ВППТ в уже существующую систему МППТ [1], [2].

Стабилизация напряжения постоянного тока необходима для обеспечения надежной и стабильной работы системы МППТ, для получения дополнительной информации по этому вопросу можно обратиться к [3], [4]. В [5], [6], [7], где предложены различные варианты управления с целью стабилизации напряжения постоянного тока. Несмотря на то что основной принцип стабилизации напряжения постоянного тока в МППТ был исследован в литературе, влияние

сопротивления линии постоянного тока на распределение баланса мощности системы постоянного тока (МППТ) с таким управлением не было должным образом проанализировано. Данная статья имеет основной целью решение этого вопроса.

Сопротивления линий постоянного тока вызывают изменения напряжения на терминалах и, таким образом, влияют на терминалы, работающие в режиме стабилизации напряжения постоянного тока, в двух случаях:

- при управлении активной мощностью в установившемся режиме;
- распределение баланса мощности в системе постоянного тока, после возникновения дефицита/избытка мощности в системе постоянного тока [8], [9].

При установившемся управлении потоком мощности влияние сопротивления линии постоянного тока на точность управления мощностью устраняется путем установления соответствующих опорных значений напряжения и мощности постоянного тока по результатам анализа нагрузки постоянного тока всей системы [10], [11]. Более подробную информацию об анализе потока нагрузки сети постоянного тока можно найти в [12], [13]. Наиболее важным в данном случае является определение опорного напряжения постоянного тока для терминалов, работающих в режиме стабилизации напряжения постоянного тока, так как большинство ошибок потока мощности в установившемся режиме возникает именно из-за неправильного определения опорного напряжения постоянного тока [14], [15], в то время как неправильное определение опорной мощности преобразователя ПИН-ВППТ вызывает лишь небольшую часть ошибок потока мощности [16].

Сопротивление линии постоянного тока также оказывает более тонкое влияние на распределение баланса мощности в МППТ с управлением стабилизации напряжения [17]. Напряжения шины постоянного тока всех терминалов изменяются всякий раз, когда происходит изменение потока мощности в системе постоянного тока. Однако напряжения на шине постоянного тока изменяются неравномерно из-за сопротивления линии постоянного тока. Это, в свою очередь, вызывает отклонение в распределении баланса мощности системы постоянного тока из-за действия регуляторов стабилизации напряжения постоянного тока [18].

Колебания напряжения на шине постоянного тока зависят от топологии и сопротивления линии постоянного тока для системы МППТ. Поэтому терминал преобразователя будет по-разному реагировать на одни и те же изменения в потоке мощности, происходящие в разных местах системы постоянного тока [19]. Выбранные константы снижения напряжения постоянного тока ρ_{DC} (и, следовательно, коэффициент усиления напряжения постоянного тока R_{DC}) также определяют степень влияния изменений напряжения на шине постоянного тока на распределение баланса мощности [20].

Целью данной статьи является исследование влияния сопротивления линии постоянного тока на распределение баланса мощности в системе МППТ при стабилизации напряжения постоянного тока. Чтобы понять влияние сопротивления линии постоянного тока на распределение баланса мощности в статье сравниваются две математические модели баланса мощности системы постоянного тока: первая из которых пренебрегает сопротивлением линии постоянного тока, а вторая учитывает это сопротивление. Система МППТ с пятью терминалами ПИН-ВППТ моделировалась в программном пакете Matlab/Simulink по двум математическим моделям, и выполнено сравнение полученных результатов.

1. Управление с целью стабилизации напряжения постоянного тока

Преобразовательный терминал ПИН-ВППТ может работать в одном из трех режимов управления, а именно: режим постоянной активной мощности, режим постоянного напряжения постоянного тока или режим стабилизации напряжения постоянного тока [21]. Управление в режиме стабилизации напряжения постоянного тока можно рассматривать как комбинацию двух типов управления ПИН-ВППТ (управление активной мощностью и управление напряжением постоянного тока). Поскольку эти два управления несколько противоречат друг другу (управление мощностью и управление напряжением постоянного тока), одно действие происходит за счет стационарных отклонений другого [22]. Схема управления в режиме стабилизации напряжения постоянного тока представлена на рис. 1а и характеристика $U(P)$ для него показана на рис. 1б.

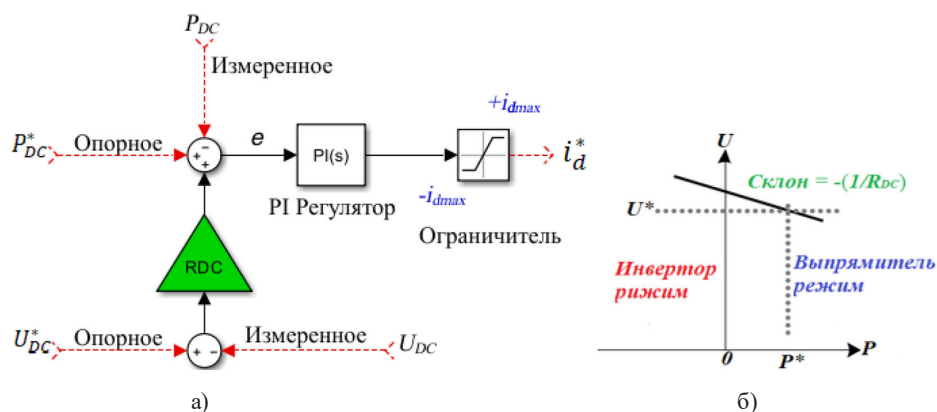


Рис. 1. а) схема управления в режиме стабилизации напряжения постоянного тока; б) характеристика $U(P)$
Fig. 1. a) direct current voltage stabilization control; b) characteristic $U(P)$

На рис. 1а символ R_{DC} относится к коэффициенту усиления напряжения постоянного тока и имеет единицу измерения МВт/Кв. Наклон характеристики $U(P)$ на рис. 1б часто определяется термином «константа снижения напряжения постоянного тока ρ_{DC} », которая представляет собой отношение изменения напряжения на шине постоянного тока к соответствующему изменению мощности преобразователя в единицах измерения [23]. Константа снижения напряжения постоянного тока ρ_{DC} и коэффициент усиления напряжения постоянного тока R_{DC} связаны друг с другом соотношением [24]:

$$R_{DC} = \frac{P_N}{U_N \rho_{DC}}, \quad (1)$$

где P_N и U_N – номинальные значения мощности и напряжения постоянного тока терминала ПИН-ВППТ соответственно.

Сигнал ошибки определяется выражением:

$$(P_{DC}^* - P_{DC}) + R_{DC} (U_{DC}^* - U_{DC}) = e = 0. \quad (2)$$

При отсутствии сигнала ошибки напряжения постоянного тока $(U_{DC}^* - U_{DC}) = 0$ мощность P_{DC} будет равна опорному значению мощности P_{DC}^* , без каких-либо отклонений в установившемся режиме [25]. Следовательно, для точного управления потоком мощности опорное напряжение постоянного тока U_{DC}^* и опорная мощность P_{DC}^* на рис. 1а должны определяться в соответствии с результатами анализа потока нагрузки постоянного тока, проведенного для всей системы постоянного тока.

При изменении опорного напряжения постоянного тока (ΔU_{DC}^*) и/или опорной мощности (ΔP_{DC}^*) уравнение (2) можно переписать как:

$$\Delta P_{DC} = \Delta P_{DC}^* + R_{DC}(\Delta U_{DC}^* - \Delta U_{DC}). \quad (3)$$

Из (3) видно, что потоком мощности на терминале постоянного тока можно управлять либо путем изменения опорной мощности (ΔP_{DC}^*) , либо путем изменения опорного напряжения постоянного тока (ΔU_{DC}^*) .

Далее исследуем влияние изменения опорной мощности (ΔP_{DC}^*) . Предполагая, что опорное напряжение постоянного тока (U_{DC}^*) остается фиксированным $(\Delta U_{DC}^* = 0)$, соотношение (3) можно упростить как:

$$\Delta P_{DC} = \Delta P_{DC}^* - R_{DC}\Delta U_{DC}. \quad (4)$$

2. Математическая модель распределения баланса мощности в идеальной системе постоянного тока

В идеальной системе постоянного тока алгебраическая сумма всех узловых введенных мощностей равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n P_{DC,i} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \Delta P_{DC,i} = 0. \quad (5)$$

После подстановки (4) в (5) получаем (6):

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_{DC,i}^* - \sum_{i=1}^n (R_{DC,i}\Delta U_{DC,i}) = 0. \quad (6)$$

В идеальной системе постоянного тока все напряжения на шине постоянного тока равны друг другу, и все изменения напряжения на шине постоянного тока равны между собой:

$$\Delta U_{DC,i} = \Delta U_{DC}, \quad i \in \{1, \dots, n\} \quad (7)$$

Подстановка (7) в (6) дает:

$$\Delta U_{DC} = \Delta U_{DC,i} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_{DC,i}^*}{\sum_{i=1}^n R_{DC,i}} = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta P_{DC,i}^*}{R_{DC, \text{итог}}}, \quad (8)$$

где $R_{DC, \text{итог}}$ – итоговый коэффициент усиления напряжения постоянного тока.

Из (4) установившееся отклонение мощности на терминале j как функция отклонения напряжения постоянного тока определяется выражением (9):

$$\Delta P_{DC,j} = \Delta P_{DC,j}^* - R_{DC,j} \Delta U_{DC,j}. \quad (9)$$

Подставляя (8) в (9), получаем:

$$\Delta P_{DC,j} = \left(1 - \frac{R_{DC,j}}{R_{DC,итог}} \right) \Delta P_{DC,j}^* - \frac{R_{DC,j}}{R_{DC,итог}} \left(\sum_{i=1, i \neq j}^n \Delta P_{DC,i}^* \right). \quad (10)$$

В матричной форме (10) переписывается как:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{DC,1} \\ \vdots \\ \Delta P_{DC,j} \\ \vdots \\ \Delta P_{DC,n} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 - \frac{R_{DC,1}}{R_{DC,итог}} & \dots & -\frac{R_{DC,1}}{R_{DC,итог}} & \dots & -\frac{R_{DC,1}}{R_{DC,итог}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{R_{DC,j}}{R_{DC,итог}} & \dots & 1 - \frac{R_{DC,j}}{R_{DC,итог}} & \dots & -\frac{R_{DC,j}}{R_{DC,итог}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{R_{DC,n}}{R_{DC,итог}} & \dots & -\frac{R_{DC,n}}{R_{DC,итог}} & \dots & 1 - \frac{R_{DC,n}}{R_{DC,итог}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \begin{bmatrix} \Delta P_{DC,1}^* \\ \vdots \\ \Delta P_{DC,j}^* \\ \vdots \\ \Delta P_{DC,n}^* \end{bmatrix} \quad (11)$$

Уравнение (10) показывает, что на поток мощности терминала может влиять как изменение опорной мощности j -го терминала ($\Delta P_{DC,j}^*$), так и изменение опорной мощности другого терминала ($\Delta P_{DC,i}^*$), но с разными знаками и коэффициентами пропорциональности для двух случаев. Более того, из (10) видно, что при отсутствии снижений напряжения в системе постоянного тока (идеальная система) распределение баланса мощности будет зависеть исключительно от коэффициента усиления напряжения постоянного тока ($R_{DC,j}$) отдельного терминала и итогового коэффициента усиления напряжения всей системы постоянного тока ($R_{DC,итог}$), независимо от места, в котором произошло изменение опорной мощности в системе постоянного тока.

3. Математическая модель распределения баланса мощности в неидеальной системе постоянного тока

Для удобства математических обозначений в дальнейшем анализе используем векторные обозначения. Векторные величины, в отличие от скалярных, и матрицы выделим жирным шрифтом. Следовательно, векторы \mathbf{P}_{DC} , \mathbf{P}_{DC}^* и \mathbf{U}_{DC} определяются как:

$$\mathbf{P}_{DC} = \begin{bmatrix} P_{DC,1} \\ \vdots \\ P_{DC,i} \\ \vdots \\ P_{DC,n} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P}_{DC}^* = \begin{bmatrix} P_{DC,1}^* \\ \vdots \\ P_{DC,i}^* \\ \vdots \\ P_{DC,n}^* \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U}_{DC} = \begin{bmatrix} U_{DC,1} \\ \vdots \\ U_{DC,i} \\ \vdots \\ U_{DC,n} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Поток мощности в систему постоянного тока через терминал постоянного тока определяется выражением:

$$\mathbf{P}_{DC} = \mathbf{U}_{DC} \mathbf{I}_{DC} = \mathbf{U}_{DC} (\mathbf{Y}_{DC} \mathbf{U}_{DC}), \quad (13)$$

где \mathbf{Y}_{DC} относится к матрице полной проводимости системы постоянного тока. Дифференцирование уравнений потока мощности \mathbf{P}_{DC} отдельных терминалов по вектору узлового напряжения \mathbf{U}_{DC} приводит к матрице Якобиан \mathbf{J}_{DC} системы постоянного тока:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{J}_{DC} &= \frac{\partial \mathbf{P}_{DC}}{\partial \mathbf{U}_{DC}} \\ &= \text{diag}(\mathbf{U}_{DC})\mathbf{Y}_{DC} + \text{diag}(\mathbf{Y}_{DC}\mathbf{U}_{DC}) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Следует учитывать, что система постоянного тока имеет начальное состояние $(\mathbf{P}_{DC}^0, \mathbf{U}_{DC}^0)$. Линеаризация уравнения потока мощности вокруг начальной установившейся точки дает:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{U}_{DC} &= \mathbf{U}_{DC}^0 + \Delta \mathbf{U}_{DC} \\ \mathbf{P}_{DC} &= \mathbf{P}_{DC}^0 + \Delta \mathbf{P}_{DC} = \mathbf{U}_{DC}^0(\mathbf{Y}_{DC}\mathbf{U}_{DC}^0) + \mathbf{J}_{DC}\Delta \mathbf{U}_{DC} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Соотношение между векторами, представляющими небольшие изменения мощности в узлах и небольшие изменения напряжения постоянного тока, определяется выражением:

$$\Delta \mathbf{P}_{DC} = \mathbf{J}_{DC}\Delta \mathbf{U}_{DC}. \quad (16)$$

$$\Delta \mathbf{U}_{DC} = \mathbf{J}_{DC}^{-1}\Delta \mathbf{P}_{DC}. \quad (17)$$

Считаем, что опорные значения постоянного напряжения остаются неизменными ($\Delta \mathbf{U}_{DC}^* = 0$). Подставляя (17) в (4), получаем:

$$\Delta \mathbf{P}_{DC} = \Delta \mathbf{P}_{DC}^* - \text{diag}(\mathbf{R}_{DC})\mathbf{J}_{DC}^{-1}\Delta \mathbf{P}_{DC}. \quad (18)$$

Уравнение (18) может быть дополнительно упрощено как:

$$\Delta \mathbf{P}_{DC} = \mathbf{B}\Delta \mathbf{P}_{DC}^*, \quad (19)$$

где матрица \mathbf{B} определяется выражением:

$$\mathbf{B} = \mathbf{J}_{DC}[\mathbf{J}_{DC} + \text{diag}(\mathbf{R}_{DC})]^{-1}. \quad (20)$$

Из (19) и (20) изменение напряжения постоянного тока ($\Delta \mathbf{U}_{DC}$) становится:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \mathbf{U}_{DC} &= \mathbf{J}_{DC}^{-1}\Delta \mathbf{P}_{DC} \\ &= \mathbf{J}_{DC}^{-1}\mathbf{J}_{DC}[\mathbf{J}_{DC} + \text{diag}(\mathbf{R}_{DC})]^{-1}\Delta \mathbf{P}_{DC}^* \\ \Delta \mathbf{U}_{DC} &= [\mathbf{J}_{DC} + \text{diag}(\mathbf{R}_{DC})]^{-1}\Delta \mathbf{P}_{DC}^* \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Сравнивая (11) и (19) можно видеть, что различия в двух уравнениях определяются различиями между матрицами \mathbf{A} и \mathbf{B} . Матрица \mathbf{A} не зависит от топологии системы постоянного тока, поскольку для вывода математической модели предполагалась идеальная система. Напротив, постоянная матрица \mathbf{B} зависит от сопротивления линии постоянного тока и от топологии системы постоянного тока. Это отражается наличием постоянной матрицы Якобиан (\mathbf{J}_{DC}) в (21). Таким образом, система уравнений (21) дает более точную математическую модель взаимодействия между изменениями управления опорной мощностью и результирующей наблюдаемой схемой потока мощности в системы постоянного тока.

4. Влияние коэффициента усиления напряжения \mathbf{R}_{DC} на распределения баланса мощности в идеальной и неидеальной системах постоянного тока

Рассмотрим влияние увеличения/уменьшения \mathbf{R}_{DC} на распределение баланса мощности. Для этого проанализируем, как изменятся матрицы \mathbf{A} и \mathbf{B} при изменении вектор-матрицы \mathbf{R}_{DC} .

Пусть \mathbf{R}_{DC}^0 является исходной вектор-матрицей коэффициента усиления напряжения постоянного тока. Выберем скалярный множитель m таким образом, чтобы новый коэффициент усиления напряжения постоянного тока \mathbf{R}'_{DC} задавался выражением:

$$\mathbf{R}'_{DC} = m\mathbf{R}_{DC}^0 \Rightarrow \mathbf{R}'_{DC,итог} = m\mathbf{R}_{DC,итог}^0 \quad (22)$$

Подставляя (22) в (11), получаем:

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} 1 - \frac{mR_{DC,1}^0}{mR_{DC,итог}^0} & \dots & -\frac{mR_{DC,1}^0}{mR_{DC,итог}^0} & \dots & -\frac{mR_{DC,1}^0}{mR_{DC,итог}^0} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{mR_{DC,j}^0}{mR_{DC,итог}^0} & \dots & 1 - \frac{mR_{DC,j}^0}{mR_{DC,итог}^0} & \dots & -\frac{mR_{DC,j}^0}{mR_{DC,итог}^0} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{mR_{DC,n}^0}{mR_{DC,итог}^0} & \dots & -\frac{mR_{DC,n}^0}{mR_{DC,итог}^0} & \dots & 1 - \frac{mR_{DC,n}^0}{mR_{DC,итог}^0} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^0 \quad (23)$$

Из (23) следует, что математическая модель распределения баланса мощности в идеальной системе постоянного тока не изменяется при умножении на скалярный множитель m . Это видно из сравнения \mathbf{A}^0 и \mathbf{A}' .

Из уравнения (22) и (20) получаем:

$$\mathbf{B}^0 = \mathbf{J}_{DC}[\mathbf{J}_{DC} + \text{diag}(\mathbf{R}_{DC}^0)]^{-1} \quad (24)$$

$$\mathbf{B}' = \mathbf{J}_{DC}[\mathbf{J}_{DC} + (m)\text{diag}(\mathbf{R}_{DC}^0)]^{-1} \neq \mathbf{B}^0 \quad (25)$$

Уравнение (25) показывает, что с увеличением значения скалярного множителя m на схему потока мощности сильнее влияют сопротивления линии системы постоянного тока (и, следовательно, ее топология). Поэтому можно заключить, что для меньших постоянных снижения напряжения постоянного тока ρ_{DC} (следовательно, для больших коэффициентов усиления постоянного напряжения R_{DC}), применяемых к терминалам ПИН-ВППТ, снижения напряжения в линии постоянного тока вызывают большее отклонение распределения баланса мощности в математической модели, которая учитывает влияние сопротивления линии постоянного тока по сравнению с математической моделью, которая игнорирует влияние сопротивления линии постоянного тока.

5. Исследование на модели

Система ПИН-ВППТ с пятью терминалами на рис. 2 была смоделирована в программном пакете Matlab/Simulink. Результаты моделирования необходимы для проверки правильности предложенных математических моделей, которые описывают распределение баланса мощности между различными терминалами.

Результаты моделирования в табл. 4 показывают, что точное управление потоком мощности достигается за счет правильного определения опорных значений мощности и напряжения постоянного тока для всех терминалов ПИН-ВППТ, что, в свою очередь, достигается с использованием всех результатов анализа потока нагрузки постоянного тока, приведенных в табл. 3.

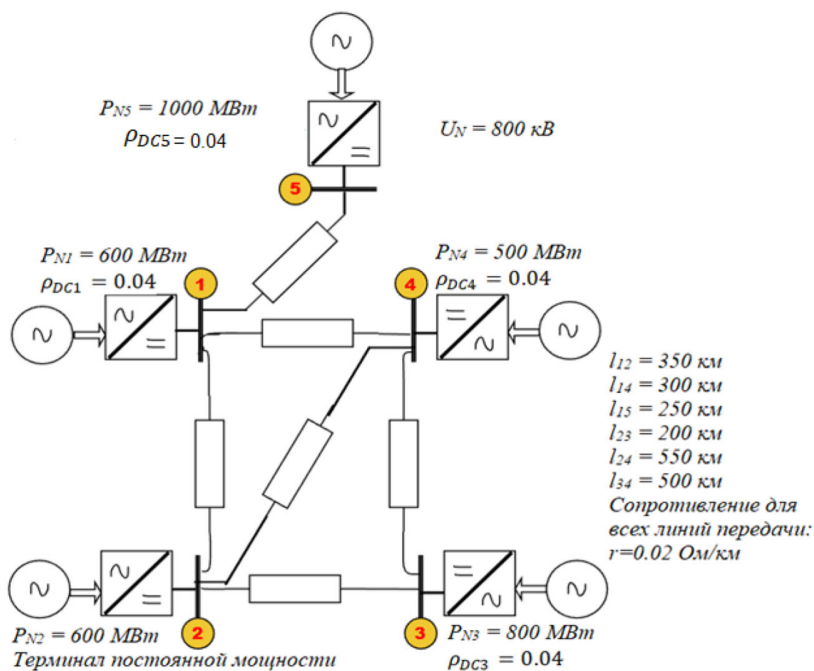


Рис. 2. Система МППТ, используемая при моделировании

Fig. 2. MTDC system used in the study of modeling

Таблица 1. Параметры терминалов ПИН-ВППТ, используемые при моделировании

Table 1. Parameters of VSC-HVDC terminals used in the simulation

Терминал №	1	2	3	4	5
$P_N \text{ (MBm)}$	600	600	800	500	1000
$U_N \text{ (кВ)}$	800	800	800	800	800
ρ_{DC}	0.04	∞	0.04	0.04	0.04
$R_{DC} \text{ (MBm/кВ)}$	18.75	0	25	15.625	31.25

Таблица 2. Желаемая схема потока мощности постоянного тока

Table 2. Desired DC power flow pattern

Терминал №	1	2	3	4	5
$P_{DC} \text{ (MBm)}$	400	-400	500	300	-800
$U_{DC} \text{ (кВ)}$	-	800	-	-	-

Таблица 3. Результаты анализа потока нагрузки постоянного тока в RastrWin3

Table 3. Results from the DC load flow analysis in RastrWin3

Терминал №	1	2	3	4	5
P_{DC}^* (МВт)	400	-400	514.4	300	-800
U_{DC} (кВ)	793.58	795.65	800	798.01	783.37

Таблица 4. Результаты моделирования с опорными значениями представлены в табл. 3

Table 4. Simulation results with reference values are presented in table 3

Терминал №	1	2	3	4	5
P_{DC} (МВт)	400.2	-400	514.4	300.4	-799.7
U_{DC} (кВ)	792.7	794.7	798.9	796.9	782

Таблица 5. Результаты моделирования для $\Delta P_{DC,2}^* = -50$ МВтTable 5. Simulation results for $\Delta P_{DC,2}^* = -50$ MW

Терминал №	U_{DC} (кВ)	P_{DC} (МВт)	ΔU_{DC} (кВ)	ΔP_{DC} (МВт)	$P_{DC,N}$ (МВт)	$\Delta P_{DC}/P_{DC,N}$
1	792	410	-0.7	9.8	600	0.01634
2	793.9	-450	-0.8	-50	600	-0.08334
3	798.3	531.7	-0.6	17.3	800	0.021623
4	796.5	310.2	-0.4	9.8	500	0.01960
5	781.9	-786.9	-0.1	12.8	1000	0.01280

Поток мощности в установившемся после применения $\Delta P_{DC,2}^* = -50$ МВт показан в табл. 5.

А. Сравнение результатов имитационного моделирования с результатами математической модели распределения баланса мощности в идеальной системе постоянного тока

Итоговый коэффициент усиления напряжения постоянного тока определяется выражением:

$$R_{DC,итог} = \sum_{i=1}^5 R_{DC,i} = 90.625 \text{ МВт/кВ.} \quad (26)$$

Подставив соответствующие значения из табл. 1 и значение из (26) в выражение (11), получим:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.7931 & -0.2069 & -0.2069 & -0.2069 & -0.2069 \\ 0.0000 & 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ -0.2758 & -0.2758 & 0.7241 & -0.2758 & -0.2758 \\ -0.1724 & -0.1724 & -0.1724 & 0.8276 & -0.1724 \\ -0.3448 & -0.3448 & -0.3448 & -0.3448 & 0.6551 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Изменение опорной мощности терминала 2 на 50 МВт ($\Delta P_{DC,2}^* = -50$ МВт) соответствует вектору $\Delta \mathbf{P}_{DC}^* = [0 -500 0 0]$ МВт. Подставляя это значение $\Delta \mathbf{P}_{DC}^*$ и значение \mathbf{A} из (27) в (11), мы находим предполагаемые изменения узлового потока мощности, показанные в табл. 6. Изменения напряжения на шине постоянного тока определяются по (8).

Таблица 6. Сравнение изменения в установившемся по математической идеальной модели с результатами моделирования Matlab/Simulink

Table 6. Comparison of the change in the steady-state mathematical ideal model with the results of Matlab/Simulink simulations

Терминал №	Изменения по математической идеальной модели (11)		Результаты моделирования Matlab/Simulink		Ошибки оценки	
	ΔU_{DC} (кВ)	ΔP_{DC} (МВт)	ΔU_{DC} (кВ)	ΔP_{DC} (МВт)	ΔU_{DC} (%)	ΔP_{DC} (%)
1	-0.5517	10.345	-0.7	9.8	-21.18	5.56
2	-0.5517	-50.000	-0.8	-50	-31.03	0.00
3	-0.5517	13.790	-0.6	17.3	-8.05	-20.28
4	-0.5517	8.620	-0.4	9.8	37.92	-12.04
5	-0.5517	17.240	-0.1	12.8	451.7	34.68

Из табл. 6 видно, что математическая идеальная модель приводит к большим ошибкам в оценке изменений напряжения на шине постоянного тока и узловых мощностей.

Б. Сравнение результатов моделирования с результатами математической модели распределения баланса мощности в неидеальной системе постоянного тока

Чтобы найти предполагаемые изменения узлового потока мощности и напряжения на шине постоянного тока после изменения опорной мощности терминала 2 ($\Delta P_{DC,2}^* = -50$ МВт), сначала мы должны вычислить матрицу полной проводимости системы постоянного тока \mathbf{Y}_{DC} и матрицу Якобиан \mathbf{J}_{DC} из (14):

$$\mathbf{Y}_{DC} = \begin{bmatrix} 0.2547 & -0.0714 & 0.0000 & -0.0834 & -0.1000 \\ -0.0714 & 0.2419 & -0.1250 & -0.0455 & 0.0000 \\ 0.0000 & -0.125 & 0.1750 & -0.0500 & 0.0000 \\ -0.0834 & -0.0455 & -0.0500 & 0.1788 & 0.0000 \\ -0.1000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.1000 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\mathbf{J}_{DC} = \begin{bmatrix} 202.3983 & -56.5988 & 0.0000 & -66.1112 & -70.2700 \\ -56.7416 & 191.7556 & -99.3375 & -36.1589 & 0.0000 \\ 0.0000 & -99.8625 & 140.4325 & -39.9450 & 0.0000 \\ -66.4615 & -36.2589 & -39.8450 & 142.7564 & 0.0000 \\ -78.2000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 77.1300 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Подставляя \mathbf{R}_{DC} из табл. 1 и \mathbf{J}_{DC} из (29) в (20), матрица \mathbf{B} принимает вид:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.7532 & -0.1916 & -0.1601 & -0.1871 & -0.1600 \\ 0.0000 & 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ -0.2151 & -0.3303 & 0.5855 & -0.2698 & -0.1395 \\ -0.1567 & -0.1807 & -0.1682 & 0.7522 & -0.1016 \\ -0.2967 & -0.2304 & -0.1925 & -0.2250 & 0.5192 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Подставляя значение $\Delta \mathbf{P}_{DC}^* = [0 -500 0 0]$ МВт и значение \mathbf{B} из (30) в (19), мы находим предполагаемые изменения узлового потока мощности, показанные в табл. 7. Изменения напряжения на шине постоянного тока определяются по (21).

Таблица 7. Сравнение изменения в установившемся по математической неидеальной модели с результатами моделирования Matlab/Simulink

Table 7. Comparison of the change in the steady-state mathematical non-ideal model with the results of Matlab/Simulink simulations

Терминал №	Изменения по математической неидеальной модели (19)		Результаты моделирования Matlab/Simulink		Ошибки оценки	
	ΔU_{DC} (кВ)	ΔP_{DC} (МВт)	ΔU_{DC} (кВ)	ΔP_{DC} (МВт)	ΔU_{DC} (%)	ΔP_{DC} (%)
1	-0.5116	9.580	-0.7	9.8	-26.91	-2.24
2	-0.8640	-50.00	-0.8	-50	8.00	0.00
3	-0.6615	16.515	-0.6	17.3	10.25	-4.53
4	-0.5789	9.035	-0.4	9.7	44.72	-6.88
5	-0.3693	11.520	-0.1	12.8	269.3	-10

Сравнение результатов табл. 6 с табл. 7 показывает, что математическая неидеальная модель распределения баланса мощности приводит к меньшему количеству ошибок по сравнению с математической идеальной моделью и дает более точные результаты.

В. Влияние коэффициента усиления постоянного напряжения R_{DC}

В табл. 8 показаны изменения узловых мощностей для $\Delta \mathbf{P}_{DC}^* = [0 100 0 0 0]$ МВт и различных значений скалярного множителя m .

Следовательно, при больших значениях коэффициента усиления напряжения увеличивается влияние топологии системы постоянного тока на распределение баланса мощности.

Г. Влияние протяжённости линии передачи постоянного тока

Из-за сопротивления линии постоянного тока на терминалах, более удалённых от терминалов, на которых происходит изменение потока мощности (терминал 2), наблюдается меньшее снижение напряжения на своей шине постоянного тока. Это объясняет, почему изменения напряжения на шине постоянного тока терминала 5 были самыми низкими во всех предыдущих случаях. Для дальнейшего уточнения этого явления аналогичное изменению опорного значения ($\Delta \mathbf{P}_{DC}^* = [0 100 0 0 0]$ МВт) были проверены для различных длин линии передачи постоянного тока между терминалами 4 и 5. Для этого константы снижения напря-

Таблица 8. Влияние коэффициента усиления напряжения постоянного тока на распределение баланса мощности

Table 8. The effect of the reinforcement coefficient of direct current on the distribution of power balance

Терминал №	$\Delta P_{DC} (MBm)$			
	Изменения по математической идеальной модели (11)	Результаты моделирования Matlab/Simulink		
		Для всех m	$m = 0.5$	$m = 1$
1	-20.69	-19.8	-21.4	-22.4
2	100	100	100	100
3	-27.58	-31.1	-34.4	-38.9
4	-17.24	-17.3	-18.4	-20.2
5	-34.48	-30.8	-25	-17.8

Таблица 9. Результаты моделирования для влияния длины линии постоянного тока

Table 9. Simulation results for the effect of DC line length

Терминал №	$\Delta P_{DC} (MBm)$			
	Изменения по математической идеальной модели (11)	Результаты моделирования Matlab/Simulink		
		$l_{15} = 50\text{км}$	$l_{15} = 100\text{км}$	$l_{15} = 250\text{км}$
1	-20.69	35.10	20.00	-21.40
2	100.00	100.00	100.00	100.00
3	-27.58	14.90	1.700	-34.40
4	-17.24	17.20	7.100	-18.40
5	-34.48	-173.00	-132.40	-25.00

жения постоянного тока терминалов 1, 2, 4 и 5 сохраняли $\rho_{DC} = 0,04$. Результаты моделирования показаны в табл. 9.

Из табл. 9 видно, что вклад терминала 5 в баланс мощности системы постоянного тока уменьшается, в то время как длина линии постоянного тока между терминалами 4 и 5 увеличивается (числа, выделенные жирным шрифтом в последней строке табл. 9). Исходя из этого, можно заметить, что терминалы ПИН-ВППТ более сильно реагируют на требования баланса мощности, возникающие на более близких расстояниях, чем на более дальних.

Выводы

В данной статье исследуется влияние сопротивления линии в системы постоянного тока на распределение баланса мощности. Продемонстрировано, что на распределение потока мощности после изменения мощности терминала (изменения опорной мощности терминала) влияют:

- топология системы постоянного тока и сопротивления линий;
- значение коэффициента усиления напряжения постоянного тока терминалов, которые работают в режиме стабилизации напряжения постоянного тока;

– место возникновения дефицита/избытка мощности.

Сопrotивление линии постоянного тока вызывает отклонения в распределении потока мощности после изменения опорной мощности терминала ПИН-ВППТ. Это доказано сравнением результатов математической модели идеальной и неидеальной систем постоянного тока.

Продемонстрировано, что математическая модель неидеальной системы дает более точные результаты распределения баланса мощности по сравнению с математической моделью идеальной системы. Это было подтверждено сравнением результатов математической модели с результатами моделирования в Matlab/Simulink.

Отмечено, что большие значения коэффициента усиления постоянного напряжения увеличивают влияние топологии системы постоянного тока на распределение баланса мощности.

Отмечено, что терминалы ПИН-ВППТ более сильно реагируют на требования баланса мощности, возникающие на более близких расстояниях, чем на более дальних.

Список литературы / References

[1] Сулова О.В. Тенденции развития и применения технологий передачи электроэнергии постоянным током: мировой и отечественный опыт. *Энергоэксперт*, 2019, 4(72), 32–42 [Suslova O. V. Trends in the development and application of DC power transmission technologies: world and domestic experience. *J. Energoexpert*, 2019, 4(72), 32–42 (in Rus)].

[2] Сулова О.В., Травин Л.В. Тенденции развития технологий передачи электроэнергии постоянным током (по материалам международного коллоквиума 2017 сигрэ а3, b4 и d1). *Энергия Единой Сети*, 2018, 1(36), 48–58 [Suslova O. V., Travin L. V. Trends in the development of DC power transmission technologies (based on the materials of the international colloquium 2017 cigrea 3, b4 and d1). *J. Energy of the Unified Network*, 2018, 1(36), 48–58 (in Rus)].

[3] Eduardo Prieto-Araujo, AgustíEgea-Alvarez, Sajjad Fekriasl, Oriol Gomis-Bellmunt. DC Voltage Droop Control Design for Multiterminal HVDC Systems Considering AC and DC Grid Dynamics, *J. IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 2(31), 575–585.

[4] Weixing Lu, Boon-Teck Ooi. Premium Quality Power Park Based on Multi-terminal HVDC, *J. IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 2(20), 973–983.

[5] Abdelwahed M.A., El-Saadany E. F. Power sharing control strategy of multiterminal VSC-HVDC transmission systems utilizing adaptive voltage droop, *J. IEEE Trans. Sustain. Energy*, 2017, 8(2), 605–615.

[6] Rouzbehi K., Miranian A., Candela J. I., Luna A., Rodriguez P. A generalized voltage droop strategy for control of multiterminal dc grids, *J. IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2015, 51(1), 607–618.

[7] Gavriluta C., Candela J. I., Rocabert J., Luna A., Rodriguez P. Adaptive droop for control of multiterminal dc bus integrating energystorage, *J. IEEE Trans. Power Del.*, 2015, 1(30), 16–24.

[8] Nanfang Yang, Damien Paire, Fei Gao, Abdellatif Miraoui, Weiguo Liu. Compensation of droop control using common load condition in DC microgrids to improve voltage regulation and load sharing. *J. Elsevier. Electrical Power and Energy Systems*, 2015, 64, 752–760.

[9] Xiaonan Lu, Josep M. Guerrero, Juan C. Vasquez. An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on Low Bandwidth Communication With DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy. *J. IEEE. Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(4), 1800–1812.

- [10] Chen X., Wang L., Sun H., Chen Y. Fuzzy logic based adaptive droop control in multi-terminal HVDC for wind power integration, *J. IEEE Trans. Energy Convers.*, 2017, 32(3), 1200–1208.
- [11] Xiao L., Xu Z., An T., Bian Z. Improved analytical model for the study of steady state performance of droop-controlled VSC–MTDC systems, *J. IEEE Trans. Power Syst.*, 2017, 32 (3), 2083–2093.
- [12] Samir Sayah, Abdellatif Hamouda. Optimal power flow solution of integrated AC-DC power system using enhanced differential evolution algorithm. *Electrical Energy Systems*, 2019, 29(2), 1–27.
- [13] Mohamadreza Baradar, Mehrdad Ghandhari. A Multi-Option Unified Power Flow Approach for Hybrid AC/DC Grids Incorporating Multi-Terminal VSC-HVDC. *J. IEEE. Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3), 2376–2383.
- [14] Yizhen Wang, Weijie Wen, Chengshan Wang, Haitao Liu, Xin Zhan, Xiaolong Xiao. Adaptive Voltage Droop Method of Multiterminal VSC-HVDC Systems for DC Voltage Deviation and Power Sharing, *J. IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(1), 169–176.
- [15] Haileselassie T.M., Uhlen K. Impact of dc line voltage drops on power flow of MTDC using droop control, *J. IEEE Trans. Power Syst.*, 2012, 27(3), 1441–1449.
- [16] Wang W., Barnes M. Power flow algorithms for multi-terminal VSC-HVDC with droop control. *J. IEEE Trans. Power Syst.*, 2014, 29(4), 1721–1730.
- [17] Chitikena Sudhesh Kumar, Y. Srinivasa Rao. DC Link voltage control for node interface in 3-phase grid tied solar pvs using adaptive fuzzy. *J. International Journal of Science Engineering and Advance Technology*, 2017, 5(5), 502–511.
- [18] Sid-Ali Amamra, Frederic Colas, Xavier Guillaud, Pierre Rault, Samuel Nguefeu. Laboratory Demonstration of a Multiterminal VSC-HVDC Power Grid. *J. IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(5), 2339–2349.
- [19] Haifeng Li, Chongru Liu, Gengyin Li, Reza Iravani. An Enhanced DC Voltage Droop-Control for the VSC–HVDC Grid. *J. IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(5), 1520–1527.
- [20] Prieto-Araujo E., Egea-Alvarez A., Fekriasl S., Gomis-Bellmunt O. DC voltage droop control design for multiterminal HVDC systems considering AC and DC grid dynamics. *J. IEEE Trans. Power Del.*, 2016, 2(31), 575–585.
- [21] Rakibuzzaman Shah, Jesus C. Sánchez, Robin Preece, Mike Barnes. Stability and control of mixed AC–DC systems with VSC-HVDC: a review. *J. IET Gener. Transm. Distrib.*, 2018, 12(10), 2207–2219.
- [22] Nsofwa M. Kangwa, Chitra Venugopal, Innocent E. Davidson. A Review of the Performance of VSC-HVDC and MTDC Systems. *J. IEEE PES-IAS PowerAfrica*, 2017, 267–273.
- [23] Enric Sánchez-Sánchez, Eduardo Prieto-Araujo, Oriol Gomis-Bellmunt, Samuel Galceran-Arellano. Systematic and optimal design of droop-controlled MMCs in MT-HVDC networks. *J. Electrical Power and Energy Systems*, 2022, 1–6.
- [24] Thams F., Eriksson R., Molinas M. Interaction of droop control structures and its inherent effect on the power transfer limits in multiterminal VSC-HVDC. *J. IEEE Trans Power Deliv.*, 2017, 32(1), 182–92.
- [25] Wenyuan Wang, Mike Barnes. Power Flow Algorithms for Multi-Terminal VSC-HVDC With Droop Control. *J. IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(4), 1721–1730.