

EDN: NSIUEU

УДК 621.3.051.024

Influence of Converter Losses on the Accuracy of Power Flow Control in Multi-Terminal System «Voltage Source Converter – High Voltage Direct Current»

Maisam Ibrahim and Vasily I. Panteleev*
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 07.03.2023, received in revised form 10.04.2023, accepted 10.08.2023

Abstract. Power losses in converters cause deviations in the power flow from the desired value in the DC network. To accurately control the power flow in a DC network, these deviations must be eliminated. The Matlab/Simulink simulation of a five-terminal PIN-TRDC system shows how to achieve precise power flow control in an MPDC system, taking into account the power losses in the converters and in the DC line.

Keywords: multi-terminal VSC-HVDC, converter losses, voltage droop, power loss, power flow control, reference voltage, reference power.

Citation: Ibrahim, M., Panteleev, V.I. Influence of converter losses on the accuracy of power flow control in multi-terminal system «voltage source converter – high voltage direct current». J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(6), 685–698. EDN: NSIUEU



Влияние потерь преобразователя на точность управления потоками мощности в многотерминальных системах «преобразователь источника напряжения – высоковольтная передача постоянного тока»

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

Аннотация. Потери мощности в преобразователях вызывают в сети постоянного тока отклонения потока мощности от желаемого значения. Для точного управления потоком мощности в сети постоянного тока необходимо устранить указанные отклонения. При моделировании пятитерминальной системы ПИН-ВППТ в Matlab/Simulink показано, как добиться точного управления потоком мощности в системе МППТ с учетом потерь мощности в преобразователях и в линии постоянного тока.

Ключевые слова: многотерминальный ПИН-ВППТ, потери в преобразователе, снижение напряжения, потери мощности, управление потоком мощности, опорное напряжение, опорная мощность.

Цитирование: Ибрагим М. Влияние потерь преобразователя на точность управления потоками мощности в многотерминальных системах «преобразователь источника напряжения – высоковольтная передача постоянного тока» / М. Ибрагим, В. И. Пантелеев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(6). С. 685–698. EDN: NSIUEU

Сокращения:

МППТ – многотерминальная электропередача постоянного тока (MTDC);

ПИН – преобразователь источника напряжения (VSC);

ВППТ – высоковольтная передача постоянного тока (HVDC);

ТОС – точка общего соединения.

Введение

Многотерминальные сети постоянного тока (МППТ) становятся популярными благодаря их высокой эффективности [1]. Кроме того, они являются рациональным решением для передачи электроэнергии на большие расстояния из-за более простого механизма управления и отсутствия проблем, характерных для сетей переменного тока [2]. Кроме того, сети МППТ на основе преобразователей источника напряжения (ПИН) позволяют осуществлять взаимосвязь с асинхронными сетями переменного тока и реверсирование потока мощности без переключения полярности напряжения [3], [4].

Точное управление оптимальным потоком мощности в сетях МППТ направлено на получение уровня потока мощности, точно соответствующего желаемым опорным значениям мощности, указанным в расписании потоков мощности [5], [6]. Отклонения потока мощности от желаемых опорных значений мощности происходят из-за неучета потерь мощности преобразователей и линий постоянного тока [7]. Кроме того, при наличии в сети МППТ терминалов, работающих в режиме стабилизации напряжения постоянного тока, снижение напряжения из-за

сопротивления линии постоянного тока вызывает большие отклонения в потоке мощности [8]. Стабилизация напряжения постоянного тока необходима для обеспечения надежной и стабильной работы системы МППТ, для получения дополнительной информации по этому вопросу можно обратиться к [9], [10]. Предложены различные варианты стабилизации напряжения постоянного тока в [11], [12], [13]. Несмотря на то что в последнее время было проведено много исследований по стабилизации напряжения на шинах постоянного тока, остаётся неизученной возможность применения стабилизации напряжения на шинах постоянного тока для обеспечения желаемых потоков мощности без каких-либо отклонений от заданных опорных значений мощности.

Целью данной статьи является исследование возможности точного управления потоком мощности в многотерминальной системе ПИН-ВППТ с учётом влияния потерь мощности преобразователя и потерь мощности в линии постоянного тока.

1. Управление терминалом ПИН-ВППТ

Управление ПИН обычно основано на использовании синхронно вращающейся системы координат d - q , в которой ось d совмещена с вектором напряжения фазы А, измеренным в точке общего соединения (ТОС) (точка x на рис. 2). Это совмещение также означает, что составляющая квадратурной оси (ось q) измерения напряжения (V_q) становится равной нулю. В данной статье рассматривается одна точка измерения мощности/тока для каждого терминала ПИН-ВППТ со стороны переменного тока в ТОС.

Управление ПИН обычно состоит из внутреннего контура управления током, обеспечивающего эффективную развязку управления активной и реактивной мощностью, и внешних контуров, которые обеспечивают опорные значения для активного и реактивного контура тока (внутреннему контуру тока) [14], [15]. На рис. 1 показаны внутренний и внешний контуры управления ПИН.

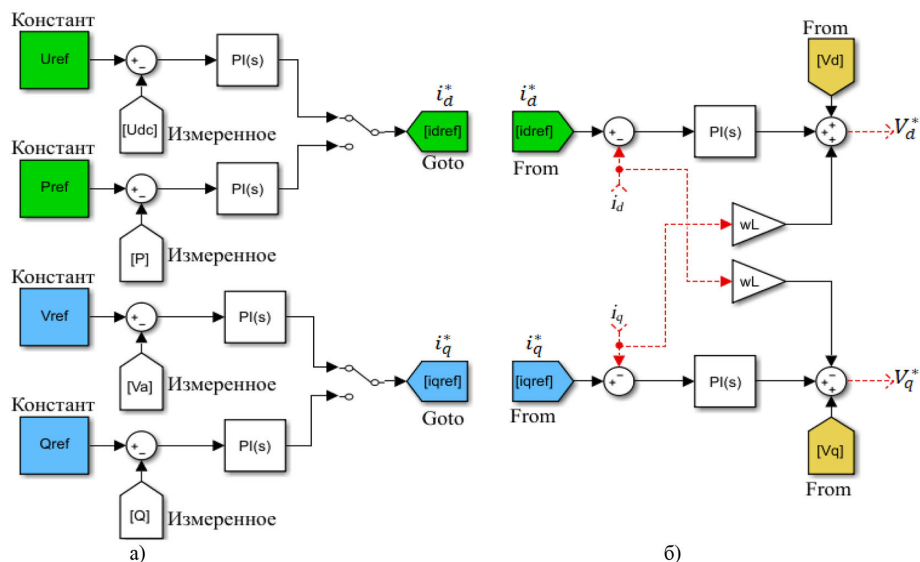


Рис. 1. а) внешний контур управления; б) внутренний контур управления током

Fig. 1. a) external control loop; b) internal current control circuit

Активный ток (i_d^*) используется для управления активной мощностью или напряжением на шине постоянного тока. Реактивный ток (i_q^*) используется для управления реактивной мощностью/напряжением переменного тока. Управление реактивной мощностью/напряжением переменного тока не является предметом этой статьи и здесь не обсуждается [16]. Существует три типа активного внешнего контура управления: управление активной мощностью; управление уровнем напряжения постоянного тока; стабилизация напряжения постоянного тока [17].

Точное управление потоком мощности не может быть проблемой в сети постоянного тока МППТ, если в эту сеть входит терминал, работающий в системе управления постоянным напряжением постоянного тока (главный терминал), и остальные терминалы в сети, работающие в системе управления постоянной мощностью (вторичные терминалы), потому что поток мощности на вторичных терминалах будет определяться в соответствии с их опорными значениями [19], [20]. Если сеть МППТ состоит из терминалов ПИН-ВППТ, работающих только в режиме постоянной мощности и в режиме стабилизации напряжения постоянного тока (главного терминала нет), то возникнет проблема с получением требуемого потока мощности на терминалах, работающих в режиме стабилизации напряжения постоянного тока [21]. Схема стабилизации напряжения постоянного тока показана на рис. 2, а и рис. 2, б).

Причина отклонения мощности от опорных значений – неучет снижения напряжения и потерь мощности в линии постоянного тока, а также потерь мощности в преобразователи при определении опорных значений [22].

Чтобы устранить отклонения мощности из-за снижения напряжения в линии постоянного тока и потерь мощности в линии постоянного тока, необходимо провести анализ потока нагрузки постоянного тока для определения его желаемого значения и использовать результаты анализа потока нагрузки в качестве опорного напряжения постоянного тока и мощности для терминалов ПИН-ВППТ [23]. Анализ потока нагрузки сети постоянного тока в этой статье выполнен в программе RastrWin3. Более подробную информацию об анализе потока нагрузки сети постоянного тока можно найти в [24], [25]. Исследование влияния снижения напряжения

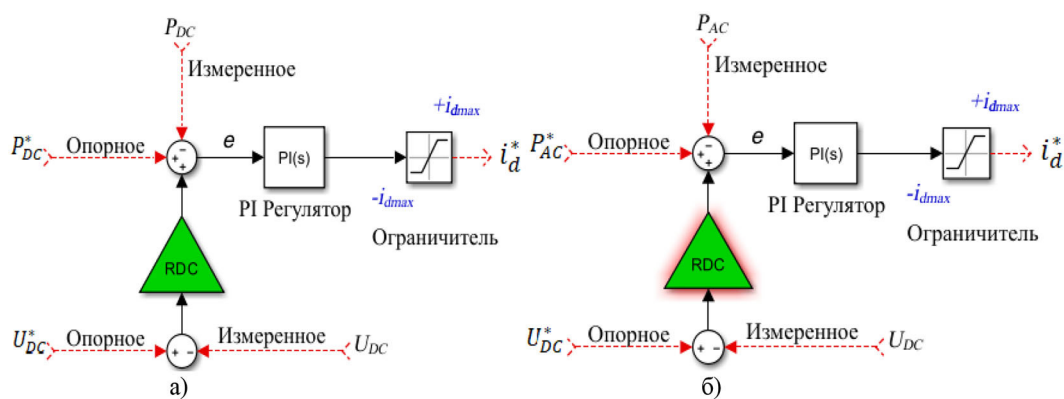


Рис. 2. Схемы стабилизации напряжения постоянного тока: а) измерение мощности со стороны переменного тока; б) измерение мощности на стороне постоянного тока

Fig. 2. DC voltage reduction control: a) measured power from the AC side; b) measured power on the DC side

постоянного тока и потерь мощности в линии постоянного тока не является целью данной статьи.

Для устранения отклонений потока мощности из-за потерь в преобразователе следует измерять мощность со стороны постоянного тока (рис. 2б), но на практике мощность измеряется со стороны переменного тока (рис. 2а) [26]. Во втором случае потери мощности в преобразователе вызывают отклонение мощности, равное потерям в преобразователе, и поэтому трудно добиться точного управления мощностью и достичь желаемых опорных значений. Для устранения отклонений потока мощности в этом случае следует учитывать потери мощности в преобразователе при определении значения опорной мощности преобразователя [27], и статья посвящена исследованию и анализу именно данной темы.

1. Потери мощности в преобразователе ВППТ

Кроме потерь на сопротивлении линии постоянного тока, потери в преобразователе также могут влиять на управление потоком мощности, если в контуре управления мощность измеряется (для внешнего контура управления) на стороне переменного тока. Приближённый способ моделирования потерь ПИН заключается в их учёте путём включения последовательно дополнительного сопротивления на стороне переменного тока преобразователя [28]. Например, на рис. 3 последовательное сопротивление (r) может представлять потери как в индуктивном фильтре, так и в полупроводниках. Этот подход, хотя и упрощённый, может быть достаточным, чтобы показать влияние потерь преобразователя на поток мощности в сети постоянного тока.

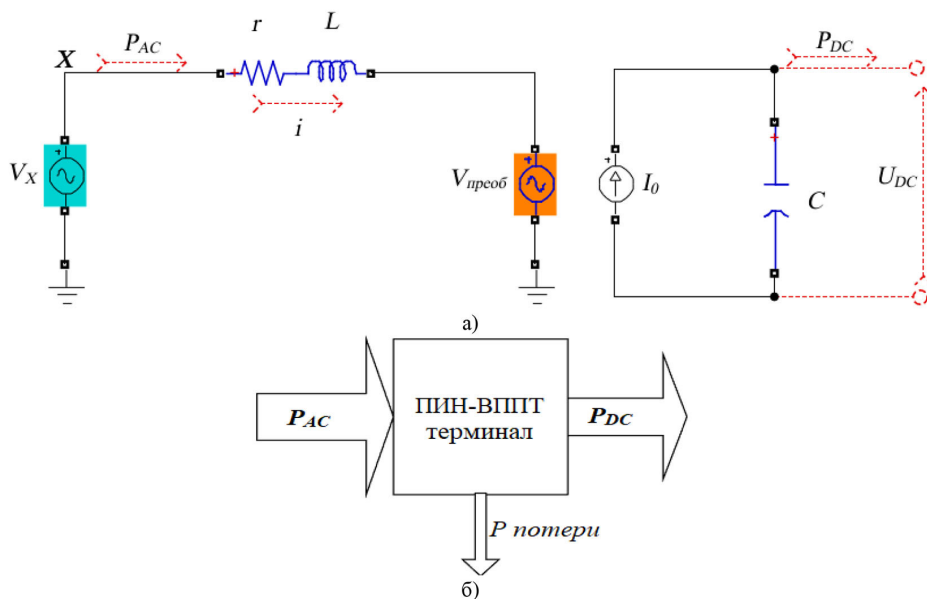


Рис. 3. Взаимосвязь измерений мощности переменного и постоянного тока ПИН-ВППТ: а) однолинейная схема ПИН; б) блок-схема потока мощности в ПИН

Fig. 3. Relationship of ac and dc side power measurements of a VSC-HVDC: а) single-line diagram of VSC; б) block diagram of power flow in VSC

Из рис. 3 измерения мощности на стороне переменного и постоянного тока связаны соотношением:

$$P_{AC} - P_{DC} - P_{\text{потери}} = 0. \quad (1)$$

Потери в ПИН вычисляются как:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{потери}} &= 3i^2r \\ &= 3 \left(\frac{P_{AC}}{3V_X} \right)^2 r \\ &= \frac{r}{3} \left(\frac{P_{AC}}{V_X} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получаем:

$$P_{AC} - P_{DC} - \frac{r}{3} \left(\frac{P_{AC}}{V_X} \right)^2 = 0. \quad (3)$$

Разделив все слагаемые в (3) на номинальную мощность $P_{DC,N}$, получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{P_{AC}}{P_{DC,N}} - \frac{P_{DC}}{P_{DC,N}} - \frac{r}{3P_{DC,N}} \left(\frac{P_{AC}}{V_X} \right)^2 &= 0 \\ P_{AC,pu} - P_{DC,pu} - \frac{r}{\left(\frac{3V_X^2}{P_{DC,N}} \right)} P_{AC,pu}^2 &= 0 \\ P_{AC,pu} - P_{DC,pu} - r_{pu} P_{AC,N}^2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где индексы pu показывают, что переменные выражены в единицах.

Перестановка (4) дает:

$$P_{DC,pu} = P_{AC,pu} (1 - r_{pu} P_{AC,pu}) = 0. \quad (5)$$

Следовательно, если мощность ПИН на стороне переменного тока (P_{AC}) известна, то мощность на стороне постоянного тока может быть вычислена с помощью (5). Мощность на стороне переменного тока может быть описана как:

$$P_{AC,pu} = \frac{P_{DC,pu}}{1 - r_{pu} P_{AC,pu}}. \quad (6)$$

Поскольку $r_{pu} P_{AC,pu} \ll 1$, мы можем использовать метод аппроксимации Тейлора

$\frac{1}{1 - r_{pu} P_{AC,pu}} \cong 1 + r_{pu} P_{AC,pu}$. Следовательно, выражение в (6) может быть дополнительно

упрощено как:

$$\left. \begin{aligned} P_{AC,pu} &= \frac{P_{DC,pu}}{1 - r_{pu} P_{AC,pu}} \cong 1 + r_{pu} P_{AC,pu} \\ &\cong 1 + r_{pu} P_{DC,pu} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Следует обратить внимание на то, что уравнение (7) основано на приближенном моделировании потерь преобразователя. На практике для получения лучших результатов при оценке мощности на стороне переменного или постоянного тока следует использовать более реалистичное моделирование потерь преобразователя при условии, что известно одно из этих двух

значений. Действительно, потери в ПИН-ВППТ должны включать не только потери в полупроводниковом преобразователе и фильтре, но и мощность, потребляемую на собственные нужды терминала в процессе работы [29]. Получение аналитического выражения общих потерь путем суммирования потерь в отдельных компонентах может быть трудоемкой задачей и не может гарантировать точность [30]. Альтернативный подход состоит в том, чтобы установить приближённое аналитическое выражение на основе эмпирических данных для общих потерь при различных уровнях передаваемой мощности через ПИН-ВППТ.

2. Моделирование и симуляция системы МППТ

Схема с пятью терминалами ПИН-ВППТ, показанная на рис. 4, была смоделирована в программной среде Matlab/Simulink.

В имитационной модели МППТ с пятью терминалами два терминала ПИН-ВППТ (терминал 2 и терминал 5) работают в режиме постоянной мощности, тогда как другие три терминала ПИН-ВППТ – в режиме снижения напряжения постоянного тока. Были проведены имитационные испытания с целью исследования влияния потерь мощности в преобразователе на потоки мощности в следующих двух случаях:

- 1) измерение мощности на стороне переменного тока, опорные значения (желаемые значения) мощности на стороне постоянного тока;
- 2) измерение мощности на стороне переменного тока и опорные значения (желаемые значения) мощности тоже со стороны переменного тока.

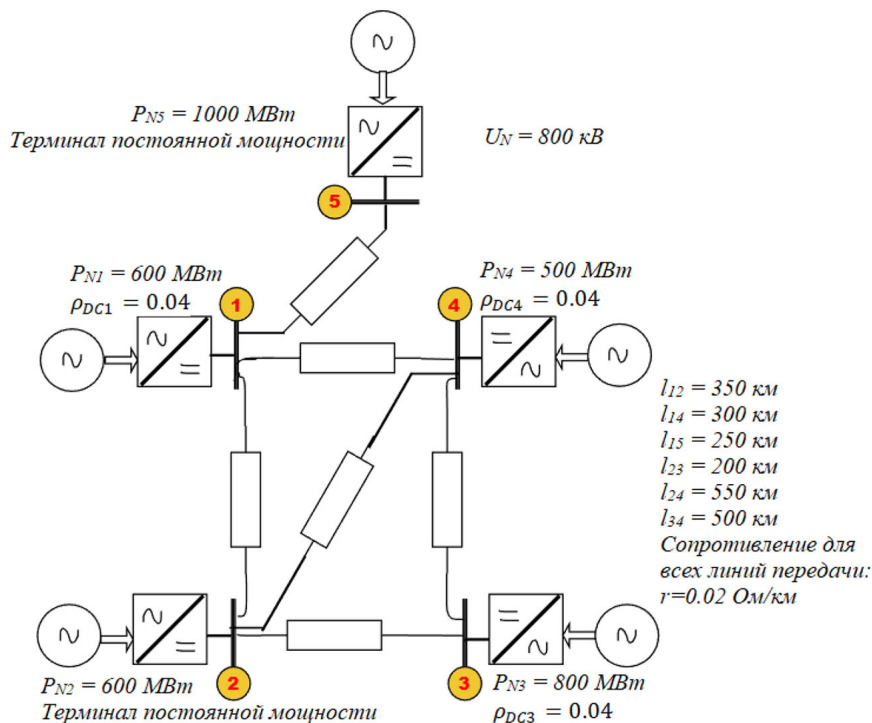


Рис. 4. Схема МППТ, используемая при изучении моделирования и симуляции

Fig. 4. MTDC circuit used in the study of modeling and simulation

Первый вариант моделирования: измерение мощности на стороне переменного тока, опорные (желаемые) значения мощности со стороны постоянного тока

Терминалы 1, 2, 4 и 5 ПИН-ВППТ желательно использовать при уровнях мощности шины постоянного тока 400 МВт, –400 МВт, 300 МВт и –800 МВт. Игнорируя потери при передаче, оставшийся терминал ПИН-ВППТ (терминал 3) должен поставлять баланс, который составляет 500 МВт. Номинальное напряжение шины постоянного тока для всех преобразователей составляет 800 кВ. В табл. 1 показан набор опорных значений.

Точное управление мощностью в сети постоянного тока требует использования анализа потока нагрузки постоянного тока для определения правильных значений опорной мощности и напряжения постоянного тока для контроллеров ПИН-ВППТ. Анализ потока нагрузки выполнен в RastrWin3. Результаты анализа потока мощности показаны в табл. 2.

Измерения используются для управлений мощностью (как на рис. 2б), значения опорных мощностей должны быть скорректированы с учетом потерь преобразователя. Если этого не сделать, потери преобразователя приведут к отклонениям потока мощности в сети постоянного тока. Чтобы продемонстрировать это с помощью моделирования, значения в табл. 2 были использованы в качестве опорного напряжения постоянного тока и опорной мощности преобразователя.

Из табл. 3 видно, что каждый из терминалов ПИН-ВППТ показывает отклонения мощности, равные соответствующим потерям преобразователя. Это происходит из-за принятых схем управления мощностью, которые «видят» и поддерживают мощности на стороне переменного тока, а не напрямую мощности на стороне постоянного тока. Чтобы решить эту проблему, модифицированные задания мощности на стороне переменного тока рассчитываются с учетом потерь преобразователя с использованием (7). Новые значения опорной мощности показаны в последней строке табл. 4.

Скорректированные значения опорных мощностей в табл. 4 использовались в управлении ПИН-ВППТ. Соответствующие результаты моделирования представлены в табл. 5.

Таблица 1. Набор опорных значений

Table 1. Setof reference values

Терминал №	1	2	3	4	5
P_{DC}^* (МВт)	400	-400	500	300	-800
U_{DC}^* (кВ)	800	800	800	800	800

Таблица 2. Результаты анализа потока нагрузки постоянного тока в RastrWin3

Table 2. 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 3. Результаты моделирования без учета потерь мощности преобразователя

Table 3. Simulation results when no consideration is taken for converter power losses

Терминал №	1	2	3	4	5
P_{DC} (МВт)	403.1	-403	518	303.1	-805.8
U_{DC} (кВ)	792.6	795	799.2	797.2	782.4
P_{DC}^* (МВт)	400	-400	514.4	300	-800
$P_{DC, error}$ (МВт)	3.1	-3	3.6	3.1	-5.8

Таблица 4. Расчет опорных значений мощности переменного тока со скорректированным значением потерь преобразователя на основе (7). ($r=0,01$ для всех преобразователей)Table 4. Computing AC side power references with converter loss compensation based on (7). ($r=0.01 pu$ for all converters)

Терминал №	1	2	3	4	5
P_{DC}^* (МВт)	400	-400	514.4	300	-800
$P_{DC,N}$ (МВт)	600	600	800	500	1000
$P_{DC,pu}^*$ (pu)	0.66667	-0.66667	0.643	0.6	-0.8
$1 + r P_{DC,pu}^*$ (pu)	1.00667	0.99334	1.00643	1.00600	0.99200
P_{AC}^* (МВт)	402.668	-397.336	517.7076	301.8	-793.6

Таблица 5. Результаты моделирования опорных мощностей на стороне переменного тока из табл. 4

Table 5. Simulation results with AC side power references coming from table 4

Терминал №	1	2	3	4	5
P_{DC} (МВт)	400	-400.2	514.8	300.5	-799.8
U_{DC} (кВ)	792.9	795	799.2	797.4	782.7
P_{DC}^* (МВт)	400	-400	514.4	300	-800
$P_{DC, error}$ (МВт)	0.00	-0.2	0.8	0.5	0.2

Из табл. 5 видно, что мощность шины постоянного тока на терминалах достаточно близка к исходным желаемым (опорным) уровням, демонстрируя эффективность корректировки (компенсации) потерь в преобразователях новыми значениями опорных мощностей.

Второй вариант моделирования: измерение мощности на стороне переменного тока и опорные значения (желаемые) мощности тоже со стороны переменного тока

На практике гораздо чаще измеряют поток мощности со стороны переменного тока. Таблица мощности (табл. 1) также обычно определяет ввод мощности со стороны сети перемен-

ного тока, а не со стороны постоянного тока. Поэтому в данном варианте моделирования исследуем влияние потерь мощности в преобразователях и способ их коррекции (компенсации) с применением внешнего контура управления, показанного на рис. 2б, но опорные (желаемые) значения мощности, указанные в таблице потоков мощности (табл. 2), на этот раз относятся к стороне переменного тока.

Сохраняем при моделировании тот же график потока мощности, который был указан ранее в табл. 2. Здесь также используются опорные значения из табл. 2. Это означает, что мощности преобразователя на стороне переменного и постоянного тока в данном случае считаются равными. При этом мы пренебрегаем потерями мощности в преобразователях. Результаты моделирования представлены в табл. 6.

И снова результаты моделирования в табл. 6 показывают некоторые отклонения потока мощности на терминалах 1, 3 и 4 от опорной мощности (хотя это относительно небольшие величины). Измерения мощности переменного и постоянного тока (P_{AC} и P_{DC}) для ПИН-ВППТ не совсем равны, но отличаются на величину, равную потерям мощности преобразователя. Отклонения вызваны пренебрежением потерями мощности преобразователей. Решение состоит в том, чтобы принять во внимание потери преобразователя вместе со снижением напряжения на шине постоянного тока и потерями мощности в линии постоянного тока при определении соответствующих опорных значений управлений ПИН-ВППТ.

Выражение (7) можно использовать для вычисления опорной мощности переменного/постоянного тока, если известно одно из двух значений. В нашем варианте моделирования опорные мощности на стороне переменного тока известны из расписания мощности (табл. 2), а опорные мощности и напряжения на стороне постоянного тока неизвестны.

Таблица 6. Результаты моделирования с опорными, не скорректированными на потери преобразователя
Table 6. Simulation results with references not adjusted for converter losses

Терминал №	1	2	3	4	5
P_{AC}^* (МВт)	400	-400	514.4	300	-800
U_{DC}^* (кВ)	793.58	795.65	800	798.01	783.37
P_{DC} (МВт)	403.1	-403	518	303.1	-805.8
U_{DC} (кВ)	792.6	795	799.2	797.2	782.4
P_{AC} (МВт)	405.8	-400.3	521.4	304.9	-799.4
$P_{AC, error}$ (МВт)	5.8	-0.3	7	4.9	0.6

Таблица 7. Желаемое расписание потока мощности со стороны переменного тока
Table 7. Desired power flow schedule on the AC side

Терминал №	1	2	3	4	5
P_{AC}^* (МВт)	400	-400	?	300	-800

Расписание потока мощности, приведенное в табл. 7, аналогично предыдущему, приведенному в табл. 2, за исключением точек измерения. В то время как в предыдущем случае опорные мощности относились к измерениям на стороне постоянного тока, в текущем случае опорные мощности относятся к измерениям на стороне переменного тока. Расчеты опорной мощности на стороне постоянного тока приведены в табл. 8. В моделях ПИН, использованных при моделировании, r_{pu} равняется 0,01.

Теперь мощности на входе шины постоянного тока известны для всех терминалов, кроме терминала 3. Следующим шагом является выполнение анализа потока мощности в сети постоянного тока с указанными мощностями постоянного тока (последняя строка в табл. 8). Таким образом, исходные данные для анализа потока мощности приведены в табл. 9.

Результат анализа потока мощности показан в табл. 10.

Из (7) и результатов анализа потока мощности можно вычислить опорные мощности терминалов на стороне переменного тока. В табл. 11 приведены полные опорные мощности, которые необходимо применять для управления ПИН-ВППТ.

Таблица 8. Расчет опорной мощности с учетом потерь преобразователя

Table 8. Power reference calculation taking converter losses into consideration

Терминал №	1	2	3	4	5
P_{AC}^* (MВт)	400	-400	?	300	-800
$P_{AC,N}$ (MВт)	600	600	800	500	1000
$P_{AC,pu}^*$ (pu)	0.66667	-0.66667	?	0.6	-0.8
$1 + r P_{AC,pu}^*$ (pu)	0.99334	1.00667	?	0.994	1.008
P_{DC} (MВт)	397.336	-402.668	x	298.2	-806.4

Таблица 9. Исходные данные для анализа потока мощности

Table 9. Input data for the power flow analysis

Терминал №	1	2	3	4	5
P_{DC} (MВт)	397.336	-402.668	x	298.2	806.4
U_{DC} (кВ)	x	x	800	x	x

Таблица 10. Результат анализа потока мощности постоянного тока

Table 10. Result of dc power flow analysis

Терминал №	1	2	3	4	5
P_{DC}^* (MВт)	397.3	-402.7	528,2	298.2	806.4
U_{DC}^* (кВ)	793,4	795,56	800	797,89	783,1

Таблица 11. Опорные мощности, скорректированные для компенсации потерь преобразователя на основе (7)

Table 11. Power references adjusted for converter loss compensations based on (7)

Терминал №	1	2	3	4	5
U_{DC}^* (кВ)	793,4	795,56	800	797,89	783,1
P_{DC}^* (МВт)	397.3	-402.7	528,2	298.2	806.4
$P_{DC,N}$ (МВт)	600	600	800	500	1000
$P_{DC,pu}^*$ (pu)	0.66217	-0.67117	0.66025	0.5964	-0.8064
$1 + r P_{DC,pu}^*$ (pu)	1.00662	0.99329	1.00660	1.00596	0.99194
P_{AC}^* (МВт)	400	-400	531.686	300	-800

Таблица 12. Результаты моделирования при использовании опорных значений мощности и напряжения постоянного тока из табл. 11

Table 12. Simulation results when power and dc voltage references from Table 11 are applied

Терминал №	1	2	3	4	5
U_{DC} (кВ)	792.6	795	799.4	797.3	782.5
P_{DC} (МВт)	397.4	-403	528.4	298.8	-806
P_{AC} (МВт)	400	-400.3	531.9	300.6	-799.5
P_{AC}^* (МВт)	400	-400	531.686	300	-800
$P_{AC, error}$ (МВт)	0.00	0.3	-0.214	0.6	0.5

Ранее упоминалось, что в текущем случае моделирования мощность управляется со стороны переменного тока. Следовательно, для управлений ПИН-ВППТ будут иметь значение только опорных мощностей переменного тока и опорного напряжения постоянного тока в табл. 11. С таким набором опорных значений, используемым в пяти терминальной модели передачи ПИН-ВППТ, получены результаты моделирования, показанные в табл. 12.

Из табл. 12 видно, что мощность шины переменного тока на терминалах достаточно близка к исходным желаемым (опорным) уровням, показывая, что потери преобразователя были эффективно скорректированы (компенсированы) новыми опорными значениями мощности.

Выводы

Потери преобразователя вызывают отклонения потока мощности от желаемых значений в расписании потока мощности. Хотя эти отклонения относительно малы, они влияют на точность оптимального управления потоком мощности.

Точное управление потоком мощности в сети постоянного тока достигается за счет учета влияния потерь преобразователя и снижения напряжения на шине постоянного тока и потерями в линии постоянного тока при определении соответствующих опорных значений управления.

Список литературы / References

- [1] Andreasson M., Dimarogonas D. V., Sandberg H., Johansson K. H. Distributed controllers for multi-terminal HVDC transmission systems, *J. IEEE Control Netw. Syst.*, 2017, 4(3), 564–574.
- [2] Van Hertem D., Ghandhari M. Multi-terminal VSC HVDC for the european super grid: Obstacles, *J. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(9), 3156–3163.
- [3] Уфа Р. А., Сулайманова В. А., Гусев А. С., Ставицкий С. А. Принципы построения гибридной модели вставки постоянного тока на базе преобразователя напряжения. *Журнал ВЕСТН. САМАР. ГОС. ТЕХН.*, 2018, 3(59), 180–189 [Ufa R. A., Sulaimanova V. A., Gusev A. S., Stavitsky S. A. Principles of constructing a hybrid model of a DC link based on a voltage converter, *J. VESTN. SAMAR. GOS. TECHN.*, 2018, 3(59), 180–189 (in Rus.)].
- [4] Вафин Ш. И., Видинеев А. В. Оценка экономической целесообразности перевода воздушных линий переменного тока 500–750 кВ на постоянный ток. *Журнал Энергетика Татарстана*, 2015, 4(40), 56–62 [Vafin Sh. I., Vidineev A. V. Estimation of the economic expediency of the transfer overhead lines of alternating current 500–750 kv into the direct current, *J. Energy of Tatarstan*, 2015, 4(40), 56–62 (in Rus.)].
- [5] Nikoobakht A., Aghaei J., Niknam T., Vahidinasab V., Farahmand H., Korpas M. Towards robust opf solution strategy for the future ac/dc grids: Case of VSC-HVDC-connected offshore wind farms, *J. IET Renewable Power Gener.*, 2018, 12(6), 691–701.
- [6] Sun F., Ma J., Yu M., Wei W. A robust optimal coordinated droop control method for multiple VSCS in ac-dc distribution network, *J. IEEE Trans. Power Syst.*, 2019, 34(6), 5002–5011.
- [7] Jamshed Ahmed Ansarl., Chongru Liu., Shahid Aziz Khan. MMC Based MTDC Grids: A Detailed Review on Issues and Challenges for Operation, Control and Protection Schemes, *J. IEEE. Access*, 2020, 8, 168154–168165.
- [8] Thams F., Eriksson R., Molinas M. Interaction of droop control structures and its inherent effect on the power transfer limits in multi-terminal VSC-HVDC, *J. IEEE Trans. Power Del.*, 2017, 32(1), 182–192.
- [9] Eduardo Prieto-Araujo., AgustíEgea-Alvarez., Sajjad Fekriasl., Oriol Gomis-Bellmunt. DC Voltage Droop Control Design for Multi-terminal HVDC Systems Considering AC and DC Grid Dynamics, *J. IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(2), 575–585.
- [10] 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.
- [11] Abdelwahed M. A., El-Saadany E. F. Power sharing control strategy of multi-terminal VSC-HVDC transmission systems utilizing adaptive voltage droop, *J. IEEE Trans. Sustain. Energy*, 2017, 8(2), 605–615.
- [12] Rouzbehi K., Miranian A., Candela J. I., Luna A., Rodriguez P. A generalized voltage droop strategy for control of multi-terminal dc grids, *J. IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2015, 51(1), 607–618.
- [13] Gavriluta C., Candela J. I., Rocabert J., Luna A., Rodriguez P. Adaptive droop for control of multi-terminal dc bus integrating energy storage, *J. IEEE Trans. Power Del.*, 2015, 30(1), 16–24.
- [14] 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.
- [15] Ting An, Guangfu Tang, Weinan Wang. Research and application on multi-terminal and DC grids based on VSC-HVDC technology in China, *J. IET. High Volt*, 2017, 2(1), 1–10.

[16] Rashid Hussain Chandio, Faheem Akhtar Chachar, Jahangeer Badar Soomro, Jamshed Ahmed Ansari, Hafiz Mudassir Munir, Hossam M., Zawbaa, Salah Kamel. Control and protection of MMC-based HVDC systems: A review, *J. ELSEVIER. Energy Reports*, 2023, 9, 1571–1588.

[17] Mahmudreza Changizian, Amirreza Mizani, Abbas Shoulaie a. A novel control method for restraining starting-up over current in VSC-HVDC System, *J. ELSEVIER. Electric Power Systems Research*, 2022, 206, 1–11.

[18] Junyi Zhai, Xinliang Dai, Yuning Jiang, Ying Xue, Veit Hagenmeyer, Colin N. Jones, Xiao-Ping Zhang. Distributed Optimal Power Flow for VSC–MTDC Meshed AC/DC Grids Using ALADIN, *J. IEEE. Transactions on Power Systems*, 2022, 37(6), 4861–4873.

[19] Yang Z., Zhong H., Bose A., Xia Q., Kang C. Optimal power flow in AC-DC grids with discrete control devices, *J. IEEE Trans. Power Syst.*, 2018, 33(2), 1461–1472.

[20] Ergun H., Dave J., Van Hertem D., Geth F. Optimal power flow for AC-DC grids: Formulation, convex relaxation, linear approximation and implementation, *J. IEEE Trans. Power Syst.*, 2019, 34(4), 2980–2990.

[21] Yizhen Wang, Bin Li, Zexin Zhou, Zhengguang Chen, Weijie Wen, Xialin Li, Chengshan Wang. DC voltage deviation-dependent voltage droop control method for VSC–MTDC systems under large disturbances, *J. IET Renew. Power Gener.*, 2020, 14(5), 891–896.

[22] Omkar Yadav, Sheetla Prasad, Nand Kishor, Richa Negi, Shubhi Purwar. Controller design for MTDC grid to enhance power sharing and stability, *J. IET Gener. Transm. Distrib.*, 2020, 14(12), 2323–2332.

[23] 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.

[24] Samir Sayah., Abdellatif Hamouda. Optimal power flow solution of integrated AC-DC power system using enhanced differential evolution algorithm, *J. Electrical Energy Systems*, 2019, 29(2), 1–27.

[25] 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.

[26] Yizhen Wang, Fengliang Qiu, Zhongguan Wang. Mode-Switching Strategy of Droop Control for VSC–MTDC Systems Considering Maximum DC Voltage Regulation Capabil, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2015, 1–10.

[27] Sunilkumar Agrawal, Prasanta Kundu. A novel multi-objective unified optimal power flow-based methodology for optimal installation of VSC-HVDC converter, *J. Electrical Energy Systems*, 2021, 31(8), 1–17.

[28] Luis M. Castro, Enrique Acha. On the Dynamic Modeling of Marine VSC-HVDC Power Grids Including Offshore Wind Farms, *J. IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(4), 2889–2900.

[29] Murthy Priya, Pathipooranam Ponnambalam, Kola Muralikumar. Modular-multilevel converter topologies and applications – a review, *J. IET Power Electronics*, 2019, 12(2), 170–183.

[30] Sawsan Sayed, Ahmed Massoud. Minimum transmission power loss in multi-terminal HVDC systems: A general methodology for radial and mesh networks, *J. Elsevier. Alexandria Engineering Journal*, 2019, 58, 115–125.