

Анализ многоканальной приемной системы переменного тока с частично сегментированной системой передачи постоянного тока высокого напряжения с использованием преобразователей напряжения (VSC-HVDC)

Ю Зуо^a, Минсяо Хань^{a,*}, Бинь Лиу^b, Тамара Егамназарова^a

^a Факультет электротехники и электроники, Северо-Китайский электроэнергетический университет, Пекин 102206, КНР

^b Центральное китайское отделение Государственной электросетевой корпорации Китая, Ухань 430077, КНР

Аннотация. Когда множество линий электропередачи LCC-HVDC плотно подключены к приёмной системе переменного тока, провалы напряжения могут легко распространяться по энергосистеме, приводя к одновременным сбоям коммутации нескольких линий LCC. VSC-HVDC может использоваться для разделения принимающей системы на несколько взаимосвязанных подсистем и повышения способности принимающей системы поддерживать напряжение. По сравнению с асинхронным соединением, которое полностью разделяет приёмные системы с VSC-HVDC, частичное сегментирование с подключением переменного тока является более подходящим методом сегментирования для многоуровневых сложных региональных энергосетей. Для анализа способности VSC поддерживать напряжение в условиях частичной сегментации была создана микроинкрементальная модель VSC, рассчитано рабочее сопротивление VSC и количественно определена функция поддержки напряжения VSC. Проанализировано влияние сбоя на способность системы к короткому замыканию, и получен метод расчета коэффициента короткого замыкания при многоканальном питании в варианте моделирования частичной сегментации. На платформе моделирования EMTDC/PSCAD была построена сегментированная модель VSC для двухканальной системы постоянного тока, и проверена достоверность микроинкрементальной модели и точность предложенных выводов.

Ключевые слова: VSC-HVDC; Частично сегментированная система; Многоканальное отношение короткого замыкания

0 Введение

С масштабным развитием возобновляемой энергетики [1] было реализовано все больше проектов по передаче электроэнергии высокого напряжения постоянного тока (HVDC) большой мощности на большие расстояния [2]. В некоторых районах с высокой концентрацией нагрузки имеется несколько источников постоянного тока. Например, в Китае западный регион не очень развит, но богат энергетическими ресурсами, в то время как восточный регион является центром нагрузки, расположенным за тысячи километров [3]. Для реализации «передачи электроэнергии с запада на восток» и полного использования возобновляемых ресурсов Китай разработал крупномасштабные проекты по передаче электроэнергии постоянного тока на основе преобразователей с линейной коммутацией (LCC)[4]. Поэтому в Центральном и Восточном Китае была разработана многоканальная система питания постоянного тока [5]. Интенсивное питание многоканального постоянного тока вызывает ряд проблем в работе и управлении системой, таких как многочисленные сбои коммутации постоянного тока и отказы цепей переменного и постоянного тока [6-9]. Укрепление приемной сети и расширение масштабов переменного тока являются эффективными методами решения вышеуказанных проблем [10], но изменить структуру сети или значительно увеличить мощность традиционного источника питания сложно из-за практических факторов, таких как географические условия и природные ресурсы в принимающем регионе.

Использование преобразователей источников напряжения (VSC) является перспективным решением задач многоканальных сетей электроснабжения с постоянным током для реализации

региональной взаимосвязи сетей электроснабжения. В существующих крупных региональных энергосистемах структура сети сложна и тесно взаимосвязана. В Китае высоковольтный канал 1000 кВ между провинциями Хэнань, Хубэй и Хунань играет важную роль в передаче электроэнергии, поддержании напряжения и отводе потоков электроэнергии. Трудно разорвать межрегиональные связи путем полного сегментирования и разделения центральной китайской энергосистемы на несколько асинхронных взаимосвязанных подсистем. Поэтому целесообразнее сохранить частичное сегментирование каналов связи. Южная энергетическая сеть Китая использует VSC-HVDC для реализации частичного сегментирования энергосистемы Гуанчжоу [11].

Было проведено множество всесторонних исследований вариантов моделирования приемных систем с входами VSC. Для измерения устойчивости гибридной системы с двойным питанием в работе [12] был предложен эффективный коэффициент короткого замыкания на основе импеданса (сопротивления), а в работе [13] был предложен эффективный коэффициент короткого замыкания гибридной системы с многоканальным питанием для количественной оценки влияния VSC на систему. В работах [14-16] были предложены гибридные системы с двойным питанием, эквивалентные системе LCCHVDC с одним входом, для анализа взаимодействия между VSC и LCC. В работе [17] использовался коэффициент корреляции Спирмена для анализа влияния VSC на четыре типа устойчивости. В работах [18,19] основное внимание уделялось VSC и предлагались различные стратегии улучшения его энергетических характеристик. Однако в этих исследованиях не рассматривался вариант моделирования сегментации и анализ взаимодействия между LCC. В работе [20] был предложен метод определения местоположения VSC в сегментированной системе; однако в этом исследовании не анализировалось влияние VSC. В работах [21,22] проводилось исследование по улучшению стабильности частоты за счет управления VSC при полной сегментации. Однако ни в одном из исследований не рассматривалась способность к поддержанию напряжения и частичная сегментация.

При частичной и полной сегментации характеристики системы полностью отличаются от характеристик рабочего состояния и функционирования VSC. При полной сегментации отсутствует соединение переменного тока между частями, и VSC выступает в качестве важного канала передачи мощности для осуществления обмена энергией между двумя частями. Одновременно, из-за распределения традиционного источника питания, VSC также должен обеспечивать инерционную (массовую) поддержку для поддержания стабильности частоты принимающей системы. При частичной сегментации каналы переменного тока существуют по обе стороны подразделения. Таким образом, задач с потоком мощности и частотой становится меньше. Однако из-за наличия соединения переменного тока несколько LCCHVDC в принимающей системе поддерживают определенную связь, что приводит к сбою коммутации при помехах; поэтому исследования частичной сегментации должны быть сосредоточены на уменьшении соединения цепей переменного тока между различными LCC-HVDC и повышении помехоустойчивости. Следовательно, при частичной сегментации основной темой исследований должна быть способность VSC поддерживать напряжение. Из-за различных акцентов в исследованиях и целей анализа двух методов сегментации необходимо использовать разные методы для анализа роли VSC в них.

В некоторых исследованиях предполагается, что эквивалентные по импедансу (сопротивлению) асинхронные устройства могут быть использованы для анализа мощности системы, содержащей асинхронный источник питания, и могут быть проведены дальнейшие исследования. Из-за нелинейности VSC он демонстрирует различные характеристики портов в разных условиях эксплуатации. Поэтому для приравнивания VSC в разных состояниях к импедансу (сопротивлению) может быть использована инкрементальная модель, которую можно подключить к системе переменного тока для проведения унифицированного анализа. Однако в полностью сегментированной системе микроинкрементальные модели двух сегментированных систем не

могут быть построены одновременно, поскольку отсутствует связь между ними; следовательно, этот метод не подходит для полностью сегментированных систем.

Для количественной оценки влияния VSC, сегментированного в системе с несколькими источниками постоянного тока, на основе характеристик мощности VSC и линии электропередачи создана микроинкрементальная модель энергосистемы. VSC можно рассматривать как эквивалент импеданса (сопротивления); тогда можно рассчитать отношение короткого замыкания при многократном питании (MISCR) и коэффициент взаимодействия при многократном питании (MIIF) для количественной оценки поддержки VSC и эффекта снижения связи LCC. Проведен типовой анализ, и проверена точность микроинкрементальной модели и соответствующего показателя.

1 Частично сегментированная система на основе VSC

1.1 Конфигурация частично сегментированной системы MISCR с учетом влияния VSC

Исходную линию электропередачи переменного тока следует отключить и заменить, чтобы разделить многоканальную систему постоянного тока на основе VSC. Конфигурация частично разделенной системы показана на рис. 1.

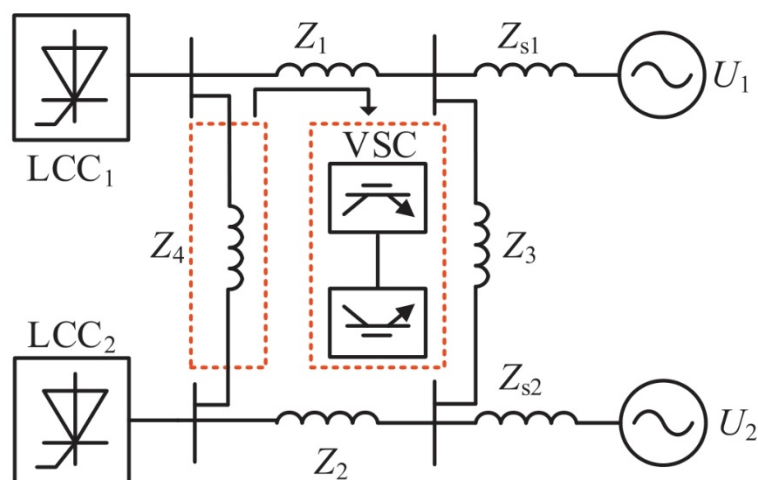


Рис. 1. Конфигурация частично сегментированной системы на основе VSC-HVDC.

Конфигурация полностью сегментированной системы показана на рис. 2. В полностью сегментированной системе между LCCs отсутствует соединение по переменному току, и они соединены с помощью VSC-HVDC.

На рис. 1 и 2 U_1 и U_2 — эквивалентные напряжения системы переменного тока, Z_{s1} и Z_{s2} — эквивалентные импедансы (сопротивления) системы, а $Z_1 - Z_4$ — импедансы (сопротивления) других линий переменного тока. LCC1 и LCC2 — преобразователи линии электропередачи высокого напряжения на постоянном токе (HVDCs) с линейной коммутацией.

Система переменного тока была разделена на две части линиями VSC и AC, каждая из которых содержала одну LCC-HVDC. Как показано на рис. 1, принимающая система частично сегментирована линией VSC вблизи двух узлов питания постоянного тока. Следовательно, сторона переменного тока имеет как соединения постоянного, так и переменного тока. Если удалить линию Z_3 , что приведет к частичной сегментации, система станет полностью сегментированной, в которой две LCC не имеют соединений переменного тока. Сравнение различных методов сегментации представлено в разделе 3.2.

В реальной энергосистеме соединения между узлами и ответвлениями сложны, и при сегментации необходимо учитывать множество факторов. Были проведены исследования региональной

сегментации сложных энергосистем на основе локальных показателей пригодности с точки зрения конфигурации системы и электрических соотношений [23]. Для удобства анализа предполагается, что система на рис. 1 была сегментирована на основе алгоритма сегментации. Система переменного тока, представленная LCC1 и U_1 , разделена на одну и ту же часть, система переменного тока, представленная LCC2 и U_2 , разделена на другую часть, и две части соединены VSC и линиями между узлами 1 и 2.

1.2 MISCR с учетом влияния VSC

Рабочая группа СИГРЭ предложила использовать MISCR для характеристики мощности многоканальной системы постоянного тока. Расчет производится следующим образом:

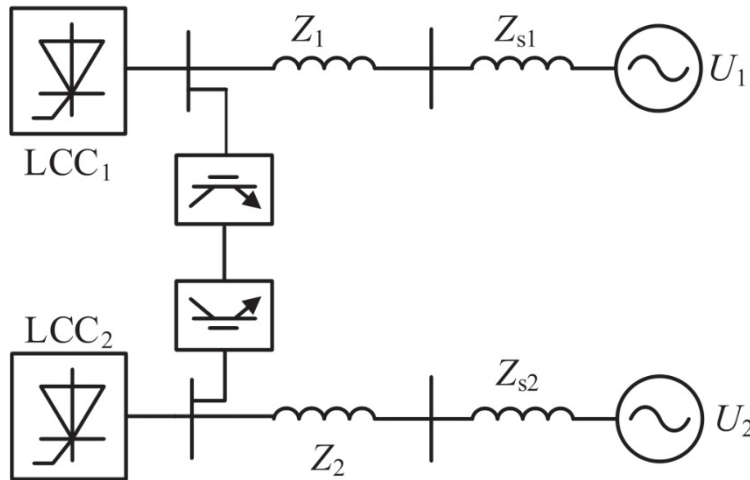


Рис. 2. Конфигурация полностью сегментированной системы.

$$\text{MISCR}_i = \frac{S_{ac}}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \text{MIIF}_{ji} P_{dj}} \quad (1)$$

где P_{di} и P_{dj} — мощности LCCs i и j соответственно, а MIIF_{ji} — MIIF двух LCCs.

Согласно определению рабочей группы СИГРЭ MIIF, в узле j шины преобразователя размещаются три реактора, так что напряжение узла j уменьшается на 1 %, а напряжение узла i уменьшается на ΔU_i . Отношение этих двух величин представляет собой MIIF, который определяется следующим образом [24]:

$$\text{MIIF}_{ij} = \frac{\Delta U_i}{1\% U_j} \quad (2)$$

MIIF часто используется для описания степени электрической связи в постоянном токе. Для краткого расчета MIIF можно использовать метод отношения элементов матрицы импеданса (сопротивлений), который представлен следующим образом:

$$\text{MIIF}_{ij} = \left| \frac{Z_{ji}}{Z_{jj}} \right| \quad (3)$$

где Z_{ji} и Z_{jj} — элементы строки j в столбце i и строки j в столбце j матрицы импеданса (сопротивлений) системы переменного тока соответственно.

Когда система сегментируется на основе VSC, метод расчета MIIF, показанный в (2), подвержен влиянию VSC и требует корректировки. Здесь VSC не влияет на мощность LCC-транспорта;

следовательно, P_{di} и P_{dj} остаются неизменными. VSC оказывает поддерживающее напряжение влияние на MIIF и мощность короткого замыкания.

Следовательно, после сегментации VSC значение MISCR системы становится следующим:

$$MISCR_i = \frac{S'_{ac}}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n MIIF'_{ji} P_{dj}} \quad (4)$$

где S'_{ac} — мощность короткого замыкания после сегментации, а $MIIF'_{ji}$ — значение MIIF с учетом VSC.

Для того чтобы расчет M_{ISCR} в многоканальных сегментированных системах с VSC стал более обоснованным, необходимо проанализировать влияние VSC на значения M_{IIF} и S_{ac} .

2 Микроинкрементальная модель всей системы

2.1 Процесс моделирования

Уравнение (3) показывает, что параметр импеданса (сопротивления) системы переменного тока можно использовать для расчета MIIF. Когда VSC подается в систему, для характеристики его эффекта его считают эквивалентным значению импеданса (сопротивления), и рассчитывается изменение MIIF после сегментации. Преобразователь является сильно нелинейным силовым электронным устройством, и VSC необходимо линеаризовать таким образом, чтобы он был эквивалентен линейному импедансу (сопротивлению). Рабочее сопротивление VSC рассчитывалось следующим образом:

$$Z_{VSC} = \frac{\Delta u_{v-d} + j\Delta u_{v-q}}{\Delta i_{v-d} + j\Delta i_{v-q}} \quad (5)$$

где $\Delta u_{v-d}, \Delta u_{v-q}, \Delta i_{v-d}$ и Δi_{v-q} микроприоросты напряжения и тока, выдаваемых VSC по оси dq.

Для VSC мощность на розетке удовлетворяет следующему условию:

$$\begin{cases} P_{VSC} = \frac{3}{2} u_{v-d} i_{v-d} + \frac{3}{2} u_{v-q} i_{v-q} \\ Q_{VSC} = -\frac{3}{2} u_{v-d} i_{v-q} + \frac{3}{2} u_{v-q} i_{v-d} \end{cases} \quad (6)$$

где $u_{v-d}, u_{v-q}, i_{v-d}$ и i_{v-q} выходные напряжения и тока VSC по оси dq.

Уравнение линеаризуется и разлагается в ряд вблизи номинальной рабочей точки. Члены более высокого порядка исключаются, и микроинкрементальная модель VSC может быть получена следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \Delta P_{VSC} \\ \Delta Q_{VSC} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \Delta i_{v-d} \\ \Delta i_{v-q} \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} \Delta u_{v-d} \\ \Delta u_{v-q} \end{bmatrix} \\ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} u_{v-d0} & u_{v-q0} \\ u_{v-q0} & -u_{v-d0} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} i_{v-d0} & i_{v-q0} \\ -i_{v-q0} & i_{v-d0} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

где $u_{v-d0}, u_{v-q0}, i_{v-d0}$ и i_{v-q0} значения выходного напряжения и тока станции VSC в стационарном режиме.

Уравнение (7) описывает взаимосвязь между микроприоростом мощности VSC и микроприоростом напряжения и тока. В сегментированной системе выходная мощность VSC поступает в систему переменного тока. Следовательно, можно построить микроинкрементальную модель системы переменного тока и микроинкрементальную модель VSC для расчета рабочего импеданса

(сопротивления) VSC, чтобы он соответствовал модели (7), и необходимо построить микроинкрементальную модель на основе соотношения мощности и напряжения системы переменного тока.

Для любой ветви системы переменного тока поток мощности от узла i к узлу j можно описать следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{S}_{ij} = \sqrt{3}\dot{U}_i\tilde{I}_{ij} \\ \dot{I}_{ij} = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_j}{R_{ij} + jX_{ij}} \end{cases} \quad (8)$$

где U_i и U_j — напряжения узлов i и j соответственно; I_{ij} — ток ветви; а R_{ij} и X_{ij} — сопротивление и реактивное сопротивление ветви соответственно. Выражения для активной и реактивной мощности от узла i к узлу j можно получить следующим образом:

$$\begin{cases} P_{ij} = \text{Re}(\dot{S}_{ij}) \\ Q_{ij} = \text{Im}(\dot{S}_{ij}) \end{cases} \quad (9)$$

Мы связываем (8) и (9) и преобразуем их в систему координат dq следующим образом:

$$\begin{cases} P_{ij} = R_{ij}u_{id}^2 - R_{ij}u_{id}u_{jd} - X_{ij}u_{id}u_{jq} \\ \quad + R_{ij}u_{iq}^2 + X_{ij}u_{iq}u_{jd} - R_{ij}u_{iq}u_{jq} \\ Q_{ij} = X_{ij}u_{iq}^2 - R_{ij}u_{iq}u_{jd} - X_{ij}u_{iq}u_{jq} \\ \quad + X_{ij}u_{id}^2 - X_{ij}u_{id}u_{jd} + R_{ij}u_{id}u_{jq} \end{cases} \quad (10)$$

Можно получить соотношения между мощностью передачи по линии, импедансом (сопротивлением) линии и напряжением на обоих концах линии в системе переменного тока. Путем линеаризации и исключения членов более высокого порядка можно получить модель микроприроста мощности в ветви переменного тока следующего вида:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta P_{ij} \\ \Delta Q_{ij} \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} \Delta u_{id} \\ \Delta u_{iq} \\ \Delta u_{jd} \\ \Delta u_{jq} \end{bmatrix} \\ \mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{Pid} & M_{Piq} & M_{Pjd} & M_{Pjq} \\ M_{Qid} & M_{Qiq} & M_{Qjd} & M_{Qjq} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

Элементы матрицы \mathbf{M} являются константами, полученными из (10), а точное выражение показано в (12).

$$\begin{cases} M_{Pid} = 2R_{ij}u_{id0} - R_{ij}u_{jd0} - X_{ij}u_{jq0} \\ M_{Piq} = 2R_{ij}u_{iq0} + X_{ij}u_{jd0} - R_{ij}u_{jq0} \\ M_{Pjd} = -R_{ij}u_{id0} + X_{ij}u_{iq0} \\ M_{Pjq} = -X_{ij}u_{id0} - R_{ij}u_{iq0} \\ M_{Qid} = 2X_{ij}u_{id0} - X_{ij}u_{jd0} + R_{ij}u_{jq0} \\ M_{Qiq} = 2X_{ij}u_{iq0} - R_{ij}u_{jd0} - X_{ij}u_{jq0} \\ M_{Qjd} = -R_{ij}u_{iq0} - X_{ij}u_{id0} \\ M_{Qjq} = R_{ij}u_{id0} - X_{ij}u_{iq0} \end{cases} \quad (12)$$

Для любого узла в системе переменного тока микроприрост мощности, подаваемой в узел, можно описать следующим образом:

$$\Delta P_i = \sum_{j=1}^n \Delta P_{ij} \quad (13)$$

где n — номер узла, подключенного к узлу i , ΔP_i — прирост мощности, подаваемой в узел, а ΔP_{ij} — микроприрост мощности ветви.

С учетом выражения для микроприроста мощности и структуры системы узлов и ветвей, модель микроприроста всей системы на стороне переменного тока может быть получена следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = M_{\Delta} \begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{bmatrix} \quad (14)$$

где ΔP и ΔQ — микроприросты мощности, подаваемой узлами, которые отличаются от определений ΔP_{ij} и ΔQ_{ij} в (11); Δu_d и Δu_q — вектор-столбцы микроприростов напряжения узлов, а M_{Δ} — соответствующая матрица коэффициентов, полученная из матрицы M в (11).

2.2 Ограничение типа управления

В зависимости от типа VSC необходимо добавлять различные ограничения. Для преобразователей с регулированием постоянной мощности можно приблизительно предположить, что микроприрост мощности всегда равен нулю; следовательно, к вышеупомянутой микроинкрементальной модели можно добавить следующие ограничения:

$$\begin{cases} \Delta P_{VSC} = 0 \\ \Delta Q_{VSC} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

где VSC в межсоединении в сегментированной схеме, стороны выпрямителя и инвертора подключаются к приемной системе. Основная цель использования сегментированной схемы VSC — поддержание баланса мощности системы, повышение стабильности напряжения приемной системы и обеспечение поддержки реактивной мощности в случае сбоя. Поэтому необходимо использовать режим управления, устанавливающий амплитуду постоянного тока и переменного напряжения на одной стороне и амплитуды постоянного и переменного напряжения на другой стороне. При управлении с постоянной амплитудой напряжения VSC может динамически поддерживать реактивную мощность.

Если система фазовой автоподстройки частоты (PLL) VSC принимает фазовый угол узла со стороны сети в качестве заданной величины, то значение u_{vq} становится равным нулю, и (6) можно переписать следующим образом:

$$\begin{cases} P_{VSC} = \frac{3}{2} u_{v-d} i_{v-d} \\ Q_{VSC} = -\frac{3}{2} u_{v-d} i_{v-q} \end{cases} \quad (16)$$

Управление амплитудой с постоянным значением напряжения в области Лапласа можно описать следующим образом:

$$i_{qref} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (V_{ref} - V_m) \quad (17)$$

где K_p — пропорциональный коэффициент усиления, K_i — интегральный коэффициент, V_{ref} — опорное напряжение, V_m — напряжение на стороне сети, а i_{qref} — ток опорного сигнала по оси q .

Кратковременное падение напряжения происходит при возникновении незначительного сбоя в системе. Это изменяет амплитуду и угол. Однако опорное значение PLL нельзя изменить мгновенно, а это означает, что u_{vq} больше не равно нулю, и реактивная мощность в (16) становится равной

$$Q'_{VSC} = -\frac{3}{2}u'_{v-d}i'_{v-q} + \frac{3}{2}u'_{v-q}i'_{v-d} \quad (18)$$

где u'_{v-d} , u'_{v-q} , i'_{v-d} и i'_{v-q} являются значениями напряжения и тока после сбоя, а Q'_{VSC} — реактивная мощность VSC после сбоя.

При кратковременном падении напряжения угол существенно не изменяется, поэтому u'_{v-d} немного меньше чем u_{v-d} и больше чем u'_{v-q} . Кроме того, из-за PI-регулятора в (17) значение тока по оси q значительно увеличивается, поэтому i'_{v-q} в (18) больше i_{v-q} . По этим двум причинам значение Q'_{VSC} больше, чем Q_{VSC} ; следовательно, поддержка реактивной мощности от VSC увеличивается после сбоя.

В целом, если сбой не превышает допустимых параметров VSC, амплитуда напряжения может поддерживаться на заданном уровне после сбоя, а ток и реактивная мощность, подаваемые от VSC, увеличиваются. После устранения сбоя указанные показатели восстанавливаются до исходного состояния.

С учетом данного режима управления, в микроинкрементальную модель можно добавить следующее ограничение:

$$\begin{cases} \Delta P_{VSC} = 0 \\ u_{v-d}^2 + u_{v-q}^2 = v_{ref}^2 \end{cases} \quad (19)$$

В сочетании с (5), (7) и (14) рабочее сопротивление преобразователя можно рассчитать, рассмотрев (15) и (19) для преобразователей с различными типами управления.

3 Влияние VSC

После определения рабочего импеданса (полного сопротивления) преобразователя, систему, показанную на рис. 1 в стационарном режиме, можно привести в эквивалентное состояние, как показано на рис. 3.

На рисунке Z_{VSC1} и Z_{VSC2} — эквивалентные импедансы (сопротивления) с обеих сторон преобразователя. В частично сегментированной системе VSC заменяет исходную линию переменного тока для снижения устойчивости соединения LCC. В стационарном режиме полное сопротивление можно использовать для выполнения количественного анализа изменения устойчивости соединения путем расчета MIIIF.

Сторону переменного тока в многокомпонентной системе постоянного тока можно описать следующим образом:

$$U = ZI \quad (20)$$

где U — напряжение узла, Z — матрица импедансов (сопротивлений) узла, I — ток инъекции в узел, а компоненты Z_{mn} в строках m и n матрицы импедансов (сопротивлений) узла представляют собой взаимное сопротивление между узлами m и n .

После сегментации конфигурация системы заменяется на показанную на рис. 2. Одна ветвь переменного тока отключается, и к узлам по обе стороны от этой ветви добавляется новая ветвь с

заземляющим импедансом (сопротивлением). Соответственно, матрица импедансов (сопротивлений) узлов и соответствующие элементы также изменяются.

3.1 Влияние VSC на MIIF

В определении MIIF расчет верен, когда напряжение системы изменяется на небольшую величину; следовательно, микроинкрементальная модель может использоваться как эквивалент VSC. После учета рабочего импеданса (полного сопротивления) VSC MIIF изменяется, и (3) становится

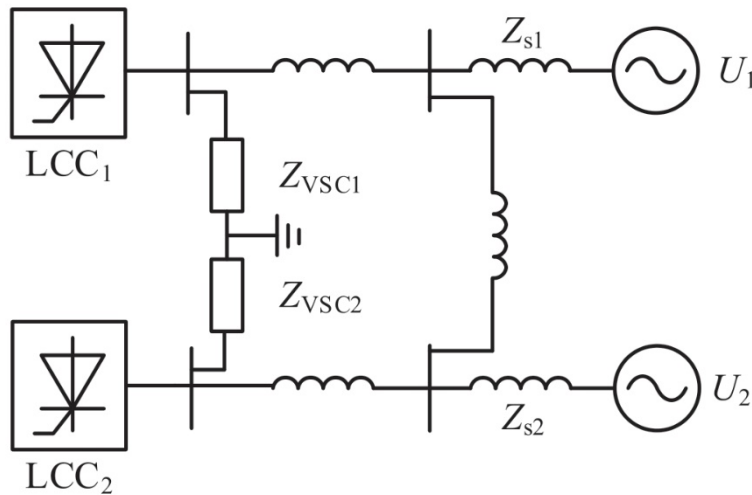


Рис. 3. Конфигурация эквивалентной системы.

$$\text{MIIF}'_{ij} = \left| \frac{Z'_{ji}}{Z'_{ij}} \right| \quad (21)$$

Влияние преобразователя на степень электрической связи постоянного тока можно определить, сравнивая изменения в MIIF.

Помимо MIIF, необходимо также обсудить влияние VSC на мощность короткого замыкания. В классической системе переменного тока мощность короткого замыкания может напрямую измерять способность традиционного источника питания поддерживать напряжение системы, как показано в (22).

$$S_{ac} = \sqrt{3}U_N I_f \quad (22)$$

где S_{ac} — мощность короткого замыкания, U_N — номинальное напряжение точки короткого замыкания, а I_f — трехфазный ток короткого замыкания.

Однако, поскольку контур управления преобразователем содержит токоограничивающую связь, ток короткого замыкания преобразователя и традиционного источника питания демонстрирует различные характеристики реагирования при коротком замыкании. Поэтому, когда система содержит преобразователь, (22) нельзя использовать непосредственно для расчета, и традиционный источник питания и преобразователь должны рассматриваться отдельно [25].

Выходной ток преобразователя был проанализирован с использованием системы координат осей d и q , и значение выходного тока преобразователя напряжения в сеть переменного тока составляет:

$$i_{vsc} = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (23)$$

Контроллер позволяет VSC поддерживать стабильность выходной мощности или амплитуды переменного напряжения. При сбое в сети переменного тока преобразователь регулирует ток, подаваемый в сеть, на основе параметров и логики управляющего звена. В зависимости от степени влияния сбоя на точку питания VSC, контур регулирования тока демонстрирует различные реакции.

Когда сбой на стороне переменного тока не оказывает существенного влияния на преобразователь, он может поддерживать базовое напряжение переменного тока порта, и происходит обмен энергией между обеими сторонами сегмента. В этот момент (16) становится равным

$$\begin{cases} P_f = P_{ref} = \frac{3}{2} u_{ref} i_{df} \\ Q_f = -\frac{3}{2} u_{ref} i_{qf} \end{cases} \quad (24)$$

где P_{ref} и u_{ref} — заданные значения активной мощности и напряжения соответственно; P_f и Q_f — выходная активная и реактивная мощность VSC после сбоя соответственно; и i_{df} и i_{qf} — выходные токи преобразователя по осям d и q после сбоя соответственно.

Когда сбой на стороне переменного тока оказывает существенное влияние на преобразователь, он не может стабилизировать амплитуду напряжения на портах. В это время входная реактивная мощность преобразователя в систему достигает верхнего предела, и соответствующий ток по оси Q i_q также достигает верхнего предела. По мере падения напряжения на портах ток по оси D также увеличивается до верхнего предела для поддержания стабильности активной мощности.

При использовании традиционного анализа мощности короткого замыкания, устройство для обрезания неисправностей преобразователя не будет подавать ток короткого замыкания в систему при возникновении серьезного сбоя; то есть, оно не будет менять значение мощности короткого замыкания. Это бессмысленно, поскольку до применения этого устройства преобразователь подает в систему большое количество реактивной мощности, и его способность поддерживать напряжение отражается в процессе сбоя. Поэтому необходимо рассматривать влияние преобразователя на мощность короткого замыкания системы с других точек зрения.

Благодаря управляющему звену преобразователь может регулировать активную и реактивную мощности, подаваемую в систему, в соответствии с управляющими командами; поэтому при рассмотрении влияния преобразователя на мощность короткого замыкания следует непосредственно учитывать максимальную мощность преобразователя.

Эквивалентное полное сопротивление преобразователя в данный момент составляет:

$$Z'_{VSC} = \frac{\Delta u_{vd} + j\Delta u_{vq}}{\Delta i_{vd} + j\Delta i_{vq}} = \infty \quad (25)$$

В данный момент эквивалентное полное сопротивление преобразователя бесконечно; преобразователь эквивалентен источнику тока и должен обеспечивать поддержку системы в соответствии с максимальной мощностью в стационарном режиме. После сегментации короткое замыкание в участке, расположенном вблизи LCC, блокируется VSC, а падение напряжения в другом участке меньше. Поэтому при анализе мощности короткого замыкания можно учитывать только VSC, расположенный вблизи LCC.

Таким образом, после сегментации системы, мощность короткого замыкания состоит из двух частей: мощности короткого замыкания, обеспечиваемой системой переменного тока, и мощности короткого замыкания, обеспечиваемой VSC, и определяется следующим образом:

$$\begin{cases} S'_{ac} = S_{ac1} + S_{ac2} \\ S_{ac1} = \sqrt{3}U_N I_f \\ S_{ac2} = \sqrt{3}U_{ref} \sqrt{I_{d\max}^2 + I_{q\max}^2} \end{cases} \quad (26)$$

где S_{ac1} — это мощность короткого замыкания, обеспечиваемая традиционным источником питания, S_{ac2} — мощность короткого замыкания, обеспечиваемая VSC, а U_{ref} — заданное значение напряжения сети преобразователя. Индекс коэффициента короткого замыкания системы после сегментации можно рассчитать, объединив (3), (4) и (26).

3.2 Сравнение интенсивности при различных режимах сегментации

Частичная и полная сегментация влияют на степень защиты системы. Согласно приведенному выше анализу, VSC снижает эффект связи между LCC. В полностью сегментированной системе отсутствует связь переменного тока между LCC; следовательно, MIIF становится равным нулю. При использовании индекса коэффициента короткого замыкания постоянный ток при частичной сегментации должен анализироваться с помощью MISCR. В полной сегментации многоканальная система разделяется на две одноканальные системы, поскольку MIIF становится равным нулю. Поэтому для анализа мощности постоянного тока можно использовать традиционный одноканальный SCR.

На рис. 1, без линии Z_3 , показана конфигурация полностью сегментированной системы. После полной сегментации отсутствует связь между двумя LCC, и изменяется показатель мощности короткого замыкания. Следовательно, расчет коэффициента короткого замыкания на одном питающем элементе после полной сегментации становится следующим:

$$S'_{CR} = \frac{S''_{ac}}{P_{dc}} \quad (27)$$

где S''_{ac} учитывает мощность короткого замыкания преобразователя и изменения конфигурации системы, а P_{dc} — мощность, подаваемая LCC.

Сравнивая состояния SCR (27) и MISCR (4) до сегментации, можно проанализировать влияние полной и частичной сегментации на силу LCC.

4 Пример анализа

На основе вышеизложенной теории была построена модель двухпоточной системы LCC на платформе моделирования EMTDC/PSCAD. Структура системы показана на рис. 1. Модель представляла собой базовую систему с частичной сегментацией. Моделирование, представленное в этом разделе, является примером системы с частичной сегментацией. Моделирование было сосредоточено на сравнении частичной сегментации и несегментации.

В числе прочих, для двух LCC-HVDC использовалась сравнительная оценка CIGRE, на основе которой были внесены некоторые изменения. Мощность обеих LCCs составляла 1000 МВт, а режимы управления включали управление фиксированным током со стороны выпрямителя и управление фиксированным углом выключения со стороны инвертора. Со стороны переменного тока $U_1 = 230\angle-$



2.5 , $U_2 = 230\angle 0$; для упрощения расчетов мы не учитываем сопротивление ветви переменного тока.

В данной модели на стороне выпрямителя VSC используется управление постоянной мощностью и амплитудой переменного напряжения, тогда как на стороне инвертора используется управление

постоянной амплитудой постоянного и переменного напряжения. Конкретные параметры звена управления приведены в таблице 1.

4.1 Расчет МИИФ на основе полного сопротивления

В процессе работы системы к точке питания LCC1 на 1,5 с был подключен реактор параллельного включения для снижения напряжения в узле преобразователя LCC1. Наблюдалось напряжение в узле преобразователя LCC2, и значения МИИФ до и после сегментации VSC сравнивались с помощью моделирования со значениями МИИФ, полученными теоретическим расчетом.

Согласно расчёту МИИФ с использованием (3), (4) и (21), в сочетании с моделированием на рис. 4, результаты, показанные в таблице 2, можно получить, сравнивая МИИФ до и после сегментации VSC:

Результаты МИИФ после сегментации показывают, что эксплуатация преобразователя с эквивалентным импедансом возможна, а МИИФ между двумя LCC значительно снижается после сегментации на основе VSC; то есть, устойчивость соединения переменного тока уменьшается.

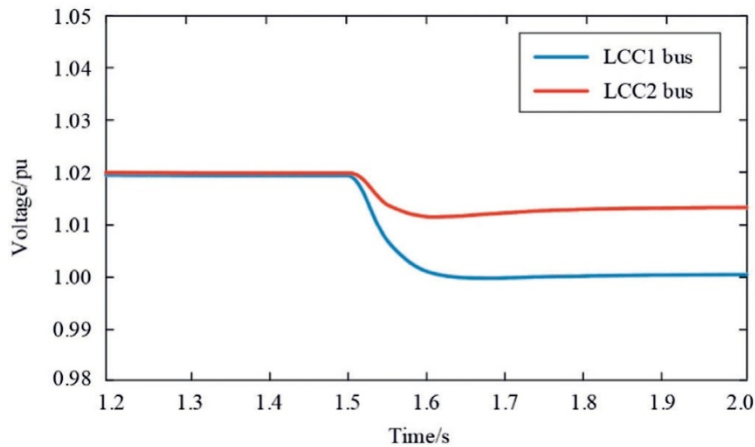
Таблица 1

Параметры системы управления.

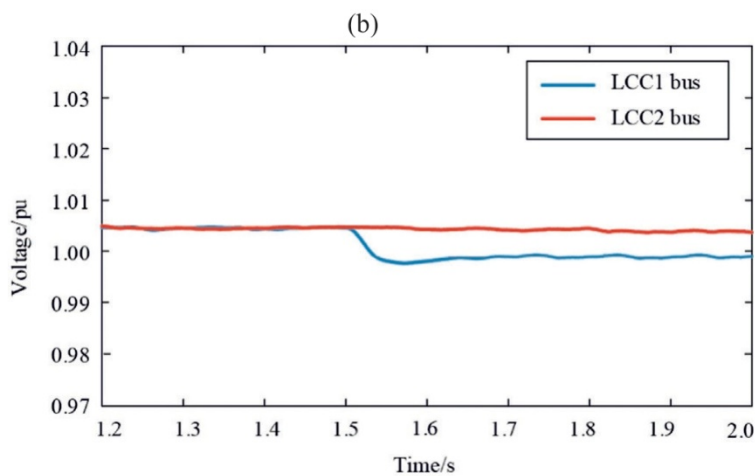
Converter	Control		K_p	K_i
Rectifier	Constant power	Outer	\	\
		Inner	60	0.0002
	Constant voltage amplitude	Outer	10	0.005
		Inner	60	0.0002
Inverter	Constant DC voltage	Outer	0.05	1.1
		Inner	60	0.0002
	Constant voltage amplitude	Outer	10	0.0012
		Inner	60	0.0002

4.2 Анализ моделирования короткого замыкания

В сегментированной системе способность преобразователя поддерживать напряжение в энергосистеме в условиях сбоя является важным фактором при оценке влияния преобразователя на повышение устойчивости энергосистемы.



(a) before segmenting



(b) after segmenting

Рис. 4. Результаты моделирования МИИФ.

Таблица 2
Сравнение МИИФ.

Result	Theoretical	Simulated
Before segmentation	0.3095	0.3401
After segmentation	0.0822	0.0909

Поскольку методы анализа обеих сторон преобразователя схожи, в качестве основного объекта анализа рассматривается только одна сторона преобразователя, а сбой создается по-разному, что приводит к различному падению напряжения на преобразователе.

Во всех примерах длительность сбоя составляет 1,5 с и длится 0,5 с. Сначала сравнивается падение напряжения в узле преобразователя LCC1 до и после сегментации, когда LCC2 неисправен в ближней зоне и установлены различные сопротивления контура заземления.

Как показано на рис. 5, VSC используется для сегментации многоканальной системы, эффективно блокируя распространение сбоя между частями. Под действием преобразователя сбой вблизи одного LCC не может легко повлиять на другой LCC.

На рис. 6 показаны токи по осям d и q преобразователя для измерения параметров сбоя при различных степенях неисправности, при этом значение порога по току по осям d и q составляет 3 кА.

При возникновении незначительного сбоя в системе переменного тока преобразователь подает в систему реактивную мощность для поддержания постоянного напряжения. В это время значение тока по оси q увеличивается, а ток по оси d остается неизменным, что соответствует сопротивлению контура заземления 20 Ом на рис. 6.

При относительно серьезной неисправности системы переменного тока ток преобразователя проявляется в двух ситуациях: когда сопротивление заземления при сбое составляет 5 Ом, ток по оси q достигает верхнего предела, а ток по оси d — нет; при этом может поддерживаться заданная активная мощность; когда сопротивление заземления при сбое составляет 0,5 Ом, токи по осям d и q достигают верхнего предела, и в этом случае регулирование активной мощности не может быть выполнено.

На рис. 7 показаны токи короткого замыкания вблизи двух точек питания LCC до и после сегментации.

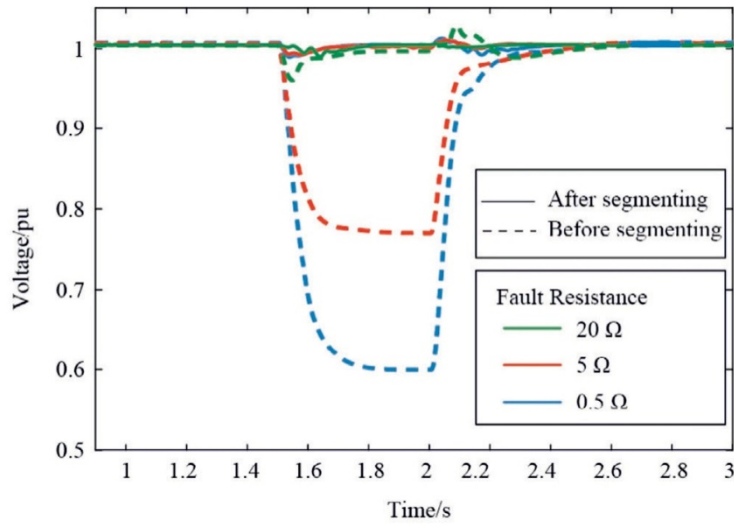
На рис. 8 показано падение напряжения в узле преобразователя LCC1 при возникновении сбоя вблизи LCC1.

Результаты сравнения мощности короткого замыкания в точке питания LCC1 приведены в таблице 3.

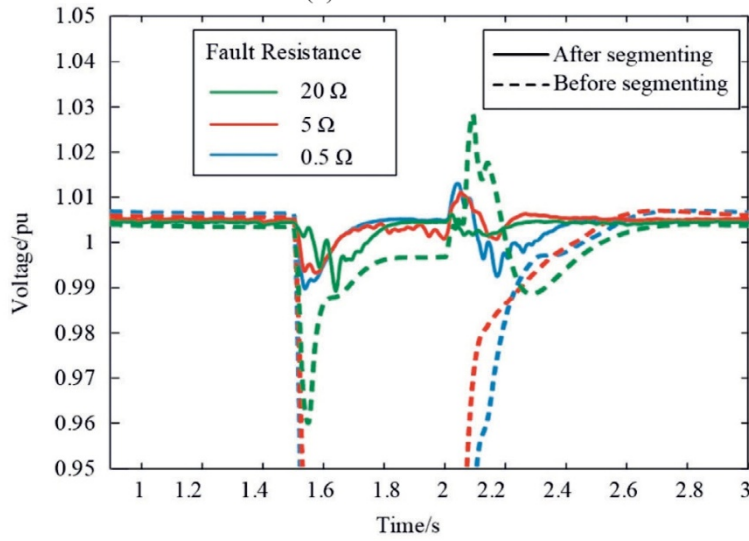
В таблице 3 алгоритм 1 рассчитывается непосредственно с использованием тока короткого замыкания и номинального напряжения, тогда как алгоритм 2 рассчитывается с использованием максимальной мощности источника тока с входным сопротивлением, близким к бесконечности.

Сопоставляя рис. 7, рис. 8 и таблицу 3, можно увидеть, что, хотя ток короткого замыкания системы уменьшается после сегментации, сопротивление точки питания LCC снижению напряжения незначительно увеличивается. Следовательно, метод расчета мощности короткого замыкания с использованием тока короткого замыкания неприменим к варианту моделирования после сегментации VSC.

Интенсивность LCC при различных методах сегментации показана в таблице 4.



(a) whole line



(b) part of the line

Рис. 5. Сравнение напряжений в узлах преобразователя в сегментированной системе.

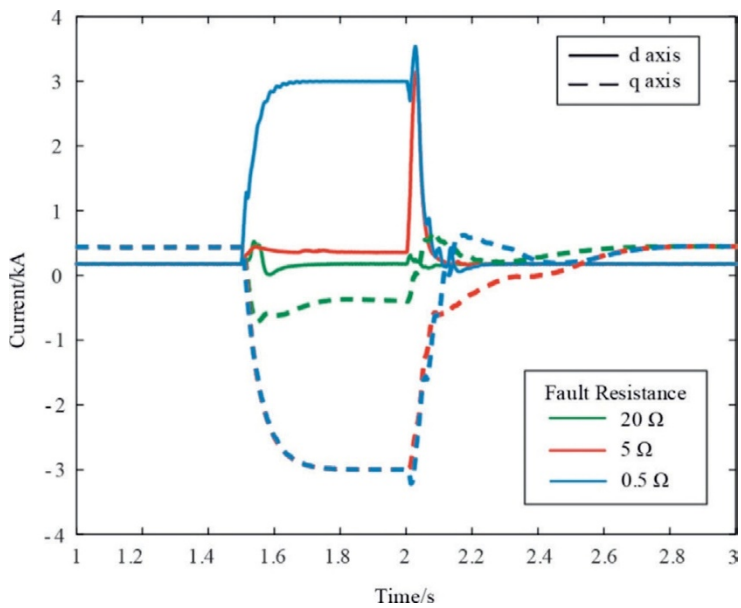


Рис. 6. Ток преобразователя по осям d-q при различных степенях помех.

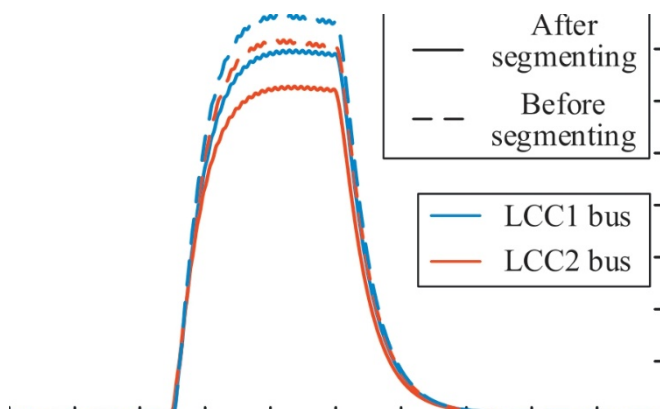


Рис. 7. Ток короткого замыкания узла преобразователя LCC в сегментированной системе.

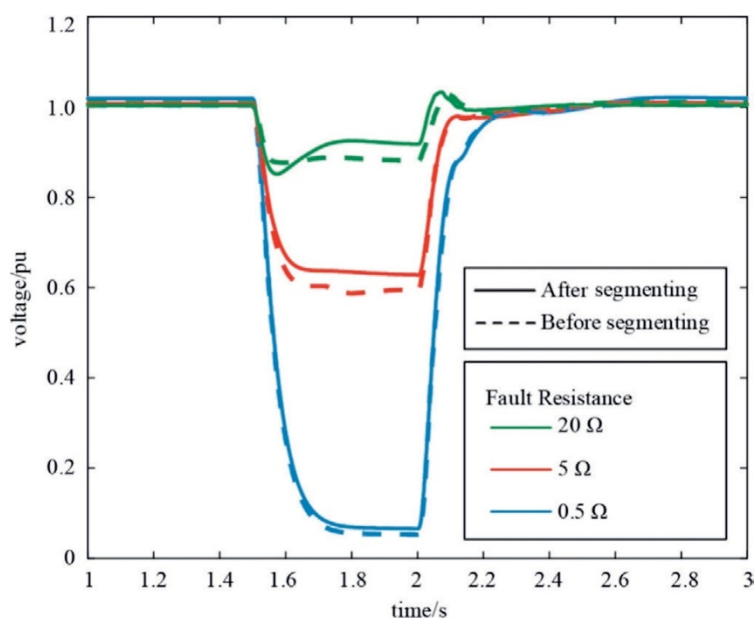


Рис. 8. Сравнение падения напряжения в узле преобразователя в сегментированной системе при коротком замыкании.

Таблица 3

Результат измерения мощности короткого замыкания (MVA).

Algorithm	Algorithm 1	Algorithm 2
Before segmentation	5,358	\
After segmentation	5,099	5,602

Таблица 4

Результат MISCR.

LCC number	LCC1	LCC2
Before segmentation	3.6772	3.4068
Incomplete segmentation	5.1343	4.5970

Когда система сегментирована частично, мощность короткого замыкания системы существенно не изменяется, а коэффициент короткого замыкания увеличивается из-за уменьшения MIIF. Из таблицы 4 и рисунков 5 и 8 видно, что частичная сегментация может повысить устойчивость системы.

5 Заключение

В данном исследовании, направленном на решение задачи сегментации многоканальных систем постоянного тока, рассматривалась частичная сегментация приемной системы с использованием VSC. Для анализа влияния VSC на приемную систему при частичной сегментации были созданы микроинкрементальные модели VSC и систем переменного тока. С помощью микроинкрементальной модели был рассчитан MIIF для уравнивания преобразователя с сопротивлением в стационарном режиме и в условиях сбоя. Наконец, было рассчитано значение MISCR, подходящее для сегментации на основе варианта моделирования с VSC.

На основе теоретических расчетов и анализа моделирования были сделаны следующие основные выводы: (1) Используя характеристики мощности VSC и энергосети, можно создать микроинкрементальную модель. На основе этой модели VSC можно рассматривать как эквивалент сопротивления, что позволяет анализировать его работу. (2) VSC может использоваться для сегментации многоканальной системы постоянного тока, что позволяет поддерживать напряжение в принимающей системе, обеспечивать реактивную мощность при сбое и предотвращать распространение помех между сегментами. Таким образом, частичная сегментация может повысить эффективность многоканальных систем. (3) Традиционный метод расчета мощности короткого замыкания не подходит для частично сегментированной системы на основе VSC. Он (VSC) должен быть эквивалентен источнику тока с входным сопротивлением, близким к бесконечности, что напрямую соответствует его максимальной мощности.

О вкладе авторов в проект CRediT

Ю Зуо: Написание оригинального текста статьи, проверка корректности, программное обеспечение, формальный анализ, подготовка данных. **Минсяо Хань:** написание текста статьи - рецензирование и редактирование, методология, концептуализация. **Бинь Лиу:** наставничество, исследование, привлечение финансирования. **Тамара Егамназарова:** написание текста статьи, рецензирование и редактирование.

О конфликте интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных связей, которые могли бы повлиять на результаты работы, представленной в данной статье.

Авторы заявляют о следующих финансовых интересах/личных отношениях, которые могут рассматриваться как потенциальный конфликт интересов: в настоящее время Бинь Лиу работает в Центральном китайском отделении Государственной электросетевой корпорации Китая.

Благодарности

Данная работа выполнена при поддержке научно-технического проекта Государственной электросетевой компании № 5108-202218280A-2-87-XG.

Список используемой литературы

- [1] Н.М. Хэгель, С.Р. Куртц, Глобальный прогресс в направлении возобновляемой электроэнергии: отслеживание роли солнечной энергии (версия 2), IEEE J.Photovolt. 12 (6) (2022) 1265-1272.
- [2] Р. Адапа, Высоковольтная технология постоянного тока: современное состояние, IEEE Power Energ.Mag. 10 (6) (2012) 18-29.

- [3] С. Баоань, Г. Минцюнь, В. Шаоу и др., Дружественные технологии передачи постоянного тока высокого напряжения для крупномасштабной возобновляемой энергетики и их инженерная практика, *Autom. Electr. Power Syst.* 45 (22) (2021) 1-8.
- [4] К.Юнфей, Дж.Гуофен, Л.Ян и др., Анализ пропускной способности исходящей сети в условиях сверхвысоковольтной сети переменного/постоянного тока, *Высоковольтные приборы* 54 (10) (2018) 33-37.
- [5] В.Бинь, К.Юпин, Д.Джие и др., Эволюционные особенности и построение системы защиты динамической устойчивости электросети центрального Китая, *Энергетические системы и технологии* 45 (8) (2021) 3238-3246.
- [6] Д.Л.Х.Аик, Г.Андерссон, Анализ взаимодействия напряжения и мощности в многоканальных системах HVDC, *IEEE Trans. Power Del.* 28 (2) (2013) 816-824.
- [7] Э.Рахими, А.М.Гоул, Дж.Б.Дэвис и др., Анализ сбоя коммутации в многоканальных системах HVDC, *IEEE Trans. Power Del.* 26 (1) (2011) 378-384.
- [8] М. Цзян, Ц.Л. Го, Х.Б. Сунь и др., Краткосрочная стабильность напряжения при ограниченном распределении нагрузки на энергоблоки для принимающей сети с многоканальными системами HVDC, *IEEE Trans. Power Syst.* 36 (3) (2021) 2603-2613.
- [9] Ю.С. Чжан, Ю.Сюй, З.Ю. Дун и др., Иерархический самоадаптивный метод анализа данных для оценки краткосрочной устойчивости напряжения энергосистемы в реальном времени, *IEEE Trans. Ind. Inf.* 15 (1) (2019) 74-84.
- [10] Д. Ян, К. Чжао, Ю.Т. Лю, Скоординированная оптимизация для управления током короткого замыкания и взаимодействием постоянного тока с несколькими источниками питания, *J. Mod Power Syst. Clean Energy* 2 (4) (2014) 274-284.
- [11] К.Вантон, Х.Чао, З.Баоронг и др., Исследование изменения структуры энергосистемы Гуандун с двойного кольца на кластер, *Proc. CSEE* 40 (20) (2020) 6557-6568.
- [12] К.Дж.Ни, А.М.Гоул, К.Ю.Чжао и др., Улучшенная мера мощности системы переменного тока для анализа производительности многоканальных систем HVDC, включая преобразователи VSC и LCC, *IEEE Trans. Power Del.* 33 (1) (2018) 169-178.
- [13] Ю.К.Ким, Г.С.Ли, К.К.Ким и др., Улучшенная мера устойчивости системы переменного тока для оценки стабильности мощности и временных перенапряжений в гибридных системах HVDC с многоканальным питанием, *IEEE Trans. Power Del.* 37 (1) (2022) 638-649.
- [14] Т.Баойе, Ю.Жичанг, Ю.Хинюэ и др., Влияние VSC-HVDC на мощность сети LCC-HVDC, принимающей электроэнергию, в гибридной системе HVDC с двухканальным питанием, *Proc. CSEE* 39 (12) (2019) 3443-3454.
- [15] Л. Вэй, Г. Чуньи, Ю. Шуо и др., Исследование механизма взаимодействия гибридной системы HVDC с двойным входом (часть I): эквивалентная модель HVDC с одинарным входом, *Proc. CSEE* 40 (18) (2020) 5911-5921.
- [16] Л. Вэй, Г. Чуньи, Ю. Шуо и др., (2020) Исследование механизма взаимодействия гибридной системы HVDC с двойным питанием (часть II): анализ запаса устойчивости малых сигналов, *Proc. CSEE* 40 (19) (2020) 6113-6121.
- [17] Р. Ф. Мохаммад, Р. Прис, Оценка влияния VSC-HVDC на взаимозависимость динамических характеристик энергосистемы в неопределенных смешанных системах AC/DC, *IEEE Trans. Power Syst.* 35 (1) (2020) 63-74.

- [18] В.Ю.Цао, М.К.Хан, С.Х.Чжан и др., Новая схема распределения мощности при управлении параллельно работающими инверторами в изолированных микросетях, IEEE J.Emerg.Select.Topics Power Electron.9 (5)(2021) 5732-5746.
- [19] М.Ф.М.Арани, Я.А.Р.И.Мохамед, Анализ и повышение производительности векторно-управляемых преобразователей напряжения в линиях электропередачи постоянного тока высокого напряжения, подключенных к очень слабым сетям, IEEE Trans.Power Syst.32(1)(2017)684-693.
- [20] К.Ксинь, Х.Миньсяо, С.Хонбо и др., Метод определения местоположения VSC-HVDC в сегментированной многоканальной системе LCCHVDC, Autom.Electr.Power Syst.45 (13) (2021) 20-29.
- [21] Дж.Б. Чжу, З.П. Шень, Л.Дж. Ю и др., Схема управления эмуляцией двусторонней инерции и демпфирования в системах передачи VSC-HVDC для асинхронных межсетевых соединений, IEEE Trans.Power Syst.38(5) (2023) 4281-4292.
- [22] А.Родригес-Каберо, Дж.Рольдан-Перес, М.Проданович и др., Соединение сетей переменного тока через межсетевые соединения VSC-HVDC для демпфирования колебаний на основе дифференциального и общего управления мощностью, IEEE Trans.Power Electron.35 (6) (2020) 6548-6558.
- [23] К. Синь, Х. Миньсяо, М. Лиминь, Метод сегментации системы LCC с многоканальным питанием на основе локальной оценки пригодности, Adv.Technol.Electr.Eng.Energy 40 (6) (2022) 32-42.
- [24] К. Ю. Чень, А. М. Гоул, М. К. Хань, Анализ смешанных инверторно-выпрямительных систем HVDC с многоканальным питанием, IEEE Trans.Power Del. 27 (3) (2012) 1565-1573.
- [25] К. Чень, Разумное определение и метод расчета мощности энергосистемы в условиях новых типов энергосистем, High Volt.Eng. 48 (10) (2022) 3805-3819.

Получено 10 июня 2024 г.; отредактировано 7 сентября 2024 г.; принято 10 октября 2024 г.

Экспертная оценка проводится под руководством компании Global Energy Interconnection Group Co.Ltd.

* Ответственный автор.

Адреса электронных почт: zetazy91@126.com (Ю. Зю), corresponding_han@163.com (М. Хань), liubing@cc.sgcc.com.cn (Б. Лиу), Tegamnazar@gmail.com (Т. Ерамназарова).

Эта статья переведена из журнала <Global Energy Interconnection> (ISSN: 2096-5117), выпуск 2, 2025 г. Оригинальное название статьи:< Analysis of multi-infeed receiving AC system with incompletely segmented VSC-HVDC>. Перевод предоставляется исключительно для справки; преимущественную силу имеет оригинал: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2024.10.015>

2096-5117/© 2025 Global Energy Interconnection Group Co.Ltd. Издательские услуги предоставлены Elsevier B.V. от имени KeAi Communications Co.Ltd. Данная статья находится в открытом доступе и распространяется по лицензии CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Ю Зуо получил степень бакалавра электротехники в Северо-Китайском электроэнергетическом университете (Пекин, Китай). В настоящее время он учится в магистратуре того же университета. Его основные научные интересы включают в себя постоянный ток высокого напряжения и силовую электронику.



Минсяо Хань получил степень доктора наук в области электротехники и автоматизации в Северо-Китайском электроэнергетическом университете (NCEPU), Пекин, Китай, в 1995 году. В настоящее время он является директором Института гибких электроэнергетических технологий NCEPU. Его научные интересы сосредоточены на применении силовой электроники в энергосистемах, включая системы HVDC, FACTS, а также преобразование и управление энергией.



Бинь Лиу получил степень доктора наук в области электротехники в Уханьском университете. Он работает в Центральном китайском отделении Государственной электросетевой корпорации Китая. Его научные интересы включают в себя энергетические системы и силовую электронику.



Тамара Егамназарова получила степени бакалавра и магистра в области электротехники в Ташкентском государственном техническом университете. В настоящее время она получает степень

доктора наук в области электротехники и электроники в Северо-Китайском энергетическом университете. Ее исследования сосредоточены на распространении гармоник и анализе устойчивости.

(Редактор: Цзэдун Чжан)