

EDN: ZAQIRS

УДК 621.3.051.024

Control Strategies of the Electrical Complex of High-Voltage Electricity Transmission Lines of the Direct Current

Maisam Ibrahim and Vasily I. Panteleev*

*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 02.12.2022, received in revised form 03.03.2023, accepted 08.02.2023

Abstract. Currently, the demand for energy is growing at a high rate, and there are problems facing the integration of the electrical network, primarily with the transmission of energy over long distances. The problem described above can be solved using HVDC transmission systems. The main advantages of these transmission systems are associated with lower transmission losses as well as lower costs compared to traditional HVAC transmission systems. For a number of reasons, voltage conversion technology (Voltage Source Converter – VSC) using Pulse Width Modulation (PWM) high voltage direct current (VSC-HVDC) transmission system has a number of potential advantages over a DC transmission system using line commutated converters. (LCC-HVDC), in particular, the implementation of multi-terminal HVDC DC transmission systems is simplified, it becomes possible to quickly and independently control active and reactive power, the possibility of bidirectional power transmission while maintaining the same DC voltage polarity. Due to the high degree of controllability of voltage source converters (VSC), it is mainly dealt with in the recent literature on HVDC operation. Much research and development has been done in the past in the field of VSC-HVDC transmission, especially in its control aspects. However, in most cases, only qualitative methods have been used to describe the operational characteristics of the various proposed management strategies. Therefore, the purpose of the research work in this article is to fill in some of the gaps, such as investigating different control strategies for VSC-HVDC terminals for use in DC networks.

Keywords: VSC-HVDC direct current transmission system, passive and active connection, internal current control loop, external control loop, characteristics U and P.

Citation: Ibrahim, M., Panteleev, V.I. Control strategies of the electrical complex of high-voltage electricity transmission lines of the direct current. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(2), 120–137. EDN: ZAQIRS



Стратегии управления электротехническим комплексом высоковольтных линий электропередачи постоянного тока

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

Аннотация. В настоящее время спрос на энергию растет высокими темпами, и возникают проблемы, стоящие перед интеграцией электрической сети, в первую очередь с передачей энергии на большие расстояния. Описанная выше проблема может быть решена с использованием систем передачи HVDC. Основные преимущества этих систем связаны с более низкими потерями при передаче, а также меньшими затратами по сравнению с традиционными системами передачи HVAC. По ряду причин технология преобразования напряжения (преобразователь источника напряжения – VSC) с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ) системы передачи постоянного тока высокого напряжения (VSC- HVDC) имеет ряд потенциальных преимуществ по сравнению с системой передачи постоянного тока с использованием преобразователей с линейной коммутацией (LCC-HVDC), в частности, упрощается реализация многотерминальных систем передачи постоянного тока HVDC, появляется возможность быстродействующего и независимого регулирования активной и реактивной мощности, возможность двунаправленной передачи мощности при сохранении неизменной полярности напряжения постоянного тока. Благодаря высокой степени управляемости преобразователей источника напряжения (VSC) в основном рассматривается в недавней литературе работа HVDC. В прошлом было проведено много исследований и разработок в области передачи VSC-HVDC, особенно в аспектах ее управления. Однако в большинстве случаев для описания операционных характеристик различных предлагаемых стратегий управления использовались только качественные методы. Поэтому цель исследовательской работы в этой статье – заполнение некоторых пробелов, таких как исследование различных стратегий управления терминалами VSC-HVDC для использования в сетях постоянного тока.

Ключевые слова: система передачи постоянного тока VSC-HVDC, пассивное и активное подключение, внутренний контур управления током, внешний контур управления, характеристики U и P .

Цитирование: Ибрагим М. Стратегии управления электротехническим комплексом высоковольтных линий электропередачи постоянного тока / М. Ибрагим, В. И. Пантелеев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(2). С. 120–137. EDN: ZAQIRS

Сокращения:

VSC: Преобразователь источника напряжения;

LLC: Line-commutated converter;

HVDC: Постоянный ток высокого напряжения;

HVAC: Переменный ток высокого напряжения;

PLL: Контур фазовой автоподстройки частоты;

ШИМ: Широтно-импульсная модуляция;

ТОС: Точка общего присоединения.

Введение

В настоящее время спрос на энергию растет высокими темпами, и возникают проблемы, стоящие перед интеграцией электрической сети, в первую очередь с передачей энергии на большие расстояния [1]. Описанная выше проблема может быть решена с использованием систем передачи HVDC. Основные преимущества этих систем связаны с более низкими потерями при передаче, а также меньшими затратами по сравнению с традиционными системами передачи HVAC [2], [3]. В системах HVDC используются два типа преобразователей: линейный коммутационный преобразователь LCC и преобразователь источника напряжения VSC [4]. По ряду причин технология преобразования напряжения (преобразователь источника напряжения – VSC) с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ) системы передачи постоянного тока высокого напряжения (VSC- HVDC) имеет ряд потенциальных преимуществ по сравнению с системой передачи постоянного тока с использованием преобразователей с линейной коммутацией (LCC-HVDC), в частности, упрощается реализация многотерминальных систем передачи постоянного тока HVDC, появляется возможность быстродействующего и независимого регулирования активной и реактивной мощности, возможность двунаправленной передачи мощности при сохранении неизменной полярности напряжения постоянного тока. Изменение направления потока мощности достигается путем изменения направления тока [5–7]. Таким образом, VSC проще интегрируются в многотерминальные системы постоянного тока [8]. Поэтому последние исследования были сосредоточены на системах VSC-HVDC. В прошлом было проведено много исследований и разработок в области передачи VSC-HVDC, особенно в аспектах ее управления. Однако в большинстве случаев для описания операционных характеристик различных предлагаемых стратегий управления использовались только качественные методы [9].

Цель исследовательской работы в этой статье –заполнение некоторых пробелов, таких как исследование различных стратегий управления терминалами VSC-HVDC для использования в сетях постоянного тока.

1. Пассивное и активное подключение VSC к сети переменного тока

Существует два типа подключения переменного тока к VSC, а именно активное и пассивное подключение к сети переменного тока.

Активное подключение к VSC означает, что терминал VSC, подключенный к сети переменного тока, имеет активные источники питания, такие как синхронные генераторы и/или другие компоненты, питающие сеть переменного тока (рис. 1а). Помимо наличия подключенных нагрузок (рис. 1б) пассивное подключение VSC означает, что VSC подключен к сети переменного тока, в которой есть только нагрузки и нет источников питания (рис. 1в) [10].

При активном подключении к VSC–HVDC должен синхронизироваться с системной частотой и может влиять на частоту только частично.

При пассивном подключении к VSC–HVDC определяет частоту, это означает, что сеть переменного тока в основном зависит от VSC для управления частотой, а также напряжением переменного тока.

Активное подключение VSC с сетями переменного тока требует более сложного управления по сравнению с пассивным подключением, которое требует относительно простого управления [11].

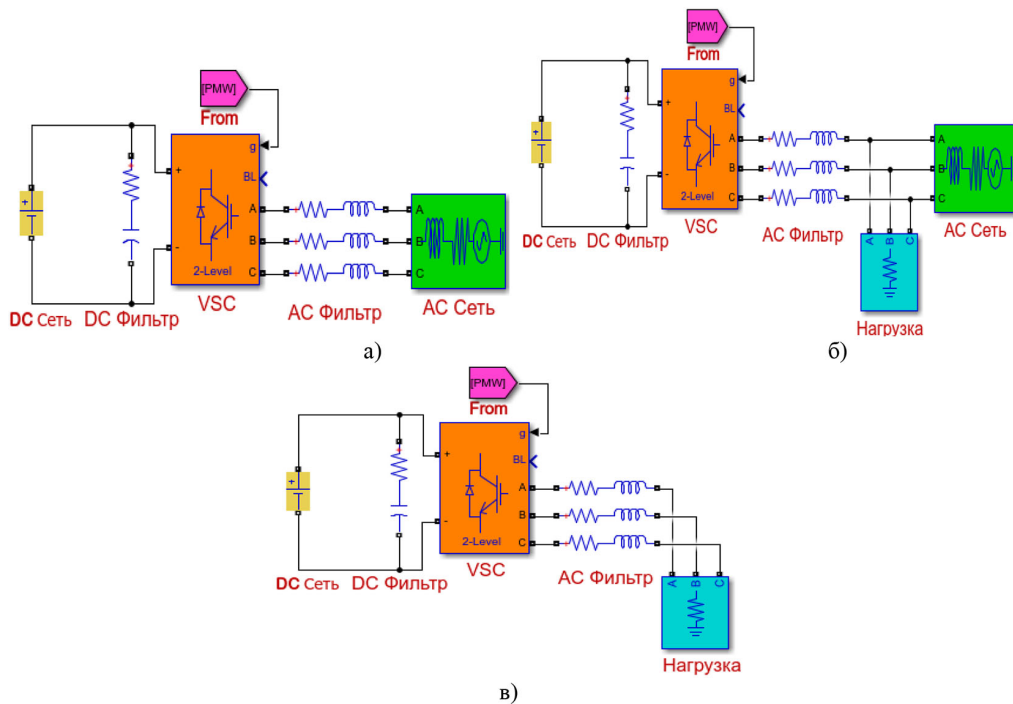


Рис. 1. Пассивное и активное подключение VSC к сети переменного тока. а) активное подключение к VSC без нагрузки; б) активное подключение к VSC с нагрузкой; в) пассивное подключение к VSC

Fig. 1. Passive and active connection of the VSC to the alternating current net. а) active connection to the VSC without load; б) active contact of the VSC with load; в) passive connection to the VSC

VSC, пассивно подключенный к сети, оснащен управлением напряжения переменного тока, позволяющим обеспечить переменное напряжение постоянного значения и постоянной частоты в точке общего присоединения (ТОС). На рис. 2, показан VSC, пассивно подключенный к сети, и соответствующее управление переменным напряжением. Точка x определяет точку соединения между VSC и сетью переменного тока. Это означает, что x в данном случае является ТОС.

ТОС обычно располагается рядом с индуктивным фильтром переменного тока, как в случае рис. 2а. V_c и V_x относятся к внутреннему напряжению переменного тока, генерируемому VSC, и напряжению переменного тока на ТОС соответственно. Z_L представляет импеданс пассивной нагрузки, а i_l относится к току нагрузки. Назначение регулятора напряжения переменного тока состоит в том, чтобы поддерживать напряжение на VSC близко к опорному значению (V_x^* на рис. 2б). Чаще всего для достижения этой цели используются пропорционально-интегральный (ПИ) или пропорциональный (П) регуляторы. Выходом контроллера является индекс модуляции (m_x), который затем передается широтно-импульсному модулятору (ШИМ).

Цепи переменного и постоянного тока (левая и правая части рис. 2а) связаны законом сохранения мощности. Это означает, что общая мощность, потребляемая тремя управляемыми источниками фазного напряжения (V_{ca} , V_{cb} , и V_{cc}), равна мощности, подаваемой управляемым источником тока I_o в шину постоянного тока. Более того, трехфазные напряжения контро-

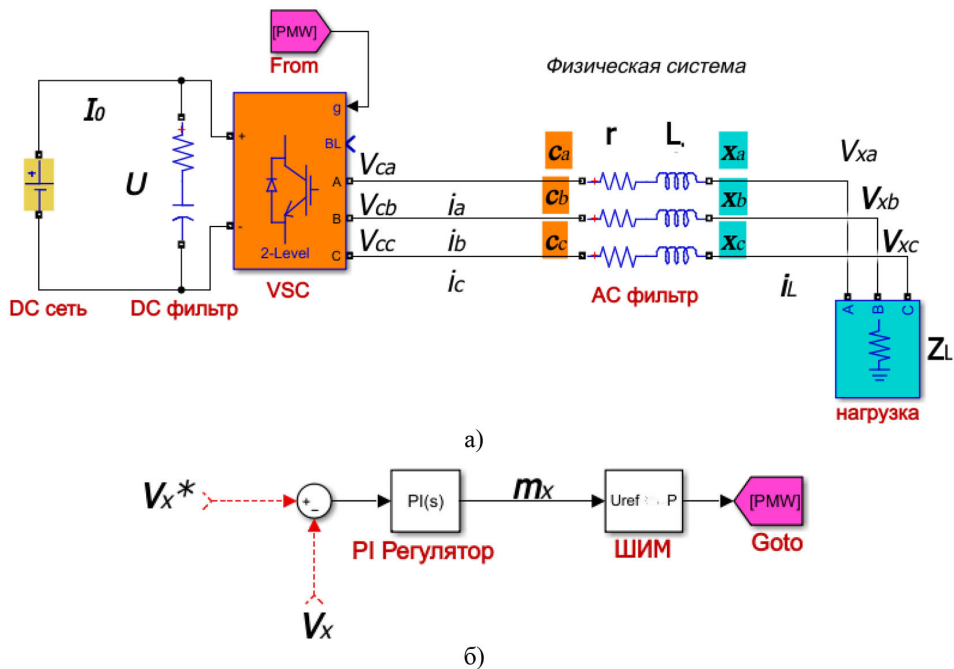


Рис. 2. VSC, пассивно подключенный к сети переменного тока с управлением напряжения переменного тока: а) физическая система; б) управление напряжения переменного тока

Fig. 2. VSC passively connected to ac net with ac voltage control: а) physical system; б) ac voltage control

лируются соответствующими индексами модуляции, а именно: m_a , m_b , и m_c . Взаимосвязь между цепями переменного и постоянного тока на рис. 2а можно резюмировать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} V_{ca} &= \frac{m_a U}{2} \\ V_{cb} &= \frac{m_b U}{2} \\ V_{cc} &= \frac{m_c U}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$I_o = \frac{m_a i_a + m_b i_b + m_c i_c}{2} \quad (2)$$

2. Внутренний контур управления током для активного подключения к сети

Внутренний контур тока является наиболее важной частью управления VSC для активного подключения к сети переменного тока. Внутренний контур тока всегда оснащен контуром фазовой автоподстройки (PLL) для определения фазового угла и частоты [12].

Есть два подхода к управлению VSC с активным подключением. Первый подход $m - \phi$, который включает прямое управление амплитудой (m) и фазовым углом (ϕ) выходного напряжения VSC по отношению к переменному напряжению на ТОС. Второй подход, обычно называемый управлением $d - q$, зависит от синхронно вращающейся системы отсчета для наблюдения за всеми величинами переменного напряжения и тока, участвующими в управлении VSC [13].

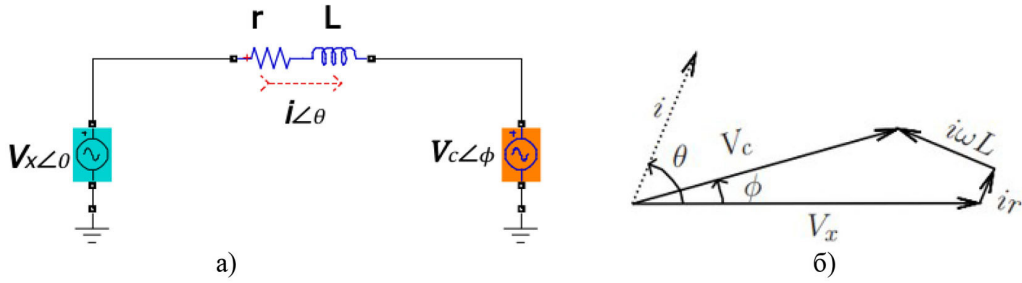


Рис. 3. Поток мощности в VSC, подключенных к активной сети: а) однолинейная диаграмма; б) векторная диаграмма

Fig. 3. Power flow in VSC connected to the active grid: а) single line diagram; б) vector diagram

Концептуально управление $m - \phi$ напрямую связано с векторным представлением VSC. Это можно понять, взглянув на диаграммы на рис. 3. Протекающий ток из сети переменного тока в VSC определяется как:

$$i\angle\theta = \frac{V_x\angle 0 - V_c\angle\phi}{r + j\omega L}. \quad (3)$$

Из векторной диаграммы на рис. 3б видно, что падение напряжения на индуктивном фильтре состоит из двух частей, а именно: падение напряжения на сопротивлении (r) и снижение напряжения на индуктивном реактивном сопротивлении ($j\omega L$). В высоковольтных приложениях снижение напряжения VSC из-за индуктивного реактивного сопротивления обычно более чем в десять раз превышает снижение напряжения на сопротивлении. В результате сопротивлением частью импеданса фильтра можно пренебречь без большой потери точности соотношения потока мощности.

Следовательно, (3) можно приближенно записать в виде:

$$i\angle\theta = \left. \begin{aligned} & \frac{V_x\angle 0 - V_c\angle\phi}{r + j\omega L} \\ & \approx -\frac{V_c \sin\phi}{\omega L} - j\frac{V_x - V_c \cos\phi}{\omega L} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Поток полной мощности (S) в VSC определяется выражением:

$$\left. \begin{aligned} S &= V_x\angle 0 (i\angle\theta)^* \\ &= V_x \left(-\frac{V_c \sin\phi}{\omega L} - j\frac{V_x - V_c \cos\phi}{\omega L} \right)^* \\ &= -\frac{V_x V_c \sin\phi}{\omega L} + j\frac{V_x (V_x - V_c \cos\phi)}{\omega L} \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Пусть m_c относится к фазору индекса модуляции. Подставив $\frac{m_c U}{2}$ вместо V_c , получим полную мощность в пересчете на индекс модуляции следующим образом:

$$S = P + jQ = -\frac{V_x m_c U \sin\phi}{2\omega L} + j\frac{V_x (2V_x - m_c U \cos\phi)}{2\omega L}. \quad (6)$$

Чувствительность полной мощности по отношению к фазовому углу (ϕ) и индексу модуляции m_c следующая:

$$\frac{\partial S}{\partial m_c} = \frac{\partial P}{\partial m_c} + j\frac{\partial Q}{\partial m_c} = -\frac{V_x U \sin\phi}{2\omega L} - j\frac{V_x U \cos\phi}{2\omega L}. \quad (7)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \phi} = \frac{\partial P}{\partial \phi} + j \frac{\partial Q}{\partial \phi} = -\frac{V_X U m_c \cos \phi}{2\omega L} + j \frac{V_X U m_c \sin \phi}{2\omega L}. \quad (8)$$

При номинальных рабочих условиях вектор индекса модуляции m_c близок к единице, в то время как угол мощности в радианах, ϕ , является небольшим числом ($|\phi| \ll 1$). Отсюда из (7) и (8) можно вывести следующее неравенство:

$$\left. \begin{aligned} \sin \phi \Big|_{\phi \rightarrow 0} &\ll m_c \cos \phi \Big|_{m_c \rightarrow 1} \\ \frac{V_X U \sin \phi}{2\omega L} \Big|_{\phi \rightarrow 0} &\ll \frac{V_X U m_c \cos \phi}{2\omega L} \Big|_{m_c \rightarrow 1} \\ \left| \frac{\partial P}{\partial m_c} \right|_{m_c \rightarrow 1} &\ll \left| \frac{\partial P}{\partial \phi} \right|_{\phi \rightarrow 0} \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Из (9) мы можем видеть, что поток активной мощности через VSC очень чувствителен к изменениям угла мощности (ϕ) и лишь слабо чувствителен к величине фазора индекса модуляции (m_c). Следуя той же процедуре, что и в (7), сравнение чувствительности потока реактивной мощности по двум параметрам (ϕ и m_c) дает неравенство, определяемое выражением:

$$\left| \frac{\partial Q}{\partial \phi} \right|_{\phi \rightarrow 0} \ll \left| \frac{\partial Q}{\partial m_c} \right|_{m_c \rightarrow 1}. \quad (10)$$

Из уравнения (10) мы видим, что поток реактивной мощности очень чувствителен к m_c и лишь незначительно зависит от изменения угла мощности ϕ . Следовательно, управление активной мощностью/током достигается за счет управления параметром угла мощности ϕ , тогда как реактивная мощность/ток управляется величиной индекса модуляции m_c . Управление $m - \phi$ требует, чтобы в потоке мощности VSC участвовали только ток и напряжение прямой последовательности.

Подход управления $d-q$ основан на представлении трехфазных величин переменного тока эквивалентным набором двухфазных величин, что приводит к идентичному результирующему пространственному вектору (называемому виртуальным потоком) [14]. Подход к управлению $d - q$ возник из областей применения электрических машин и приводов и стал наиболее доминирующим подходом к управлению во многих приложениях, связанных с VSC. Подход к управлению $d - q$ часто предполагает, что все рассматриваемые переменные величины (напряжения и токи) все время уравновешены. Если векторы X_a , X_b и X_c относятся к гипотетическим трехфазным величинам, то вектор $X_{\alpha\beta}$ задается суммарным пространственным вектором трех фаз, отстоящих друг от друга на 120° . Системы отсчета abc и $\alpha - \beta$ показаны на рис. 4.

Фазовый переход от стационарной системы отсчета abc к стационарной системе отсчета $X_{\alpha\beta}$ осуществляется преобразованием Кларка:

$$X_{\alpha\beta} = X_\alpha + jX_\beta = k \left[X_a + X_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + X_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right], \quad (11)$$

где k – постоянное число.

В матричной форме преобразование Кларка задается выражением:

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}. \quad (12)$$

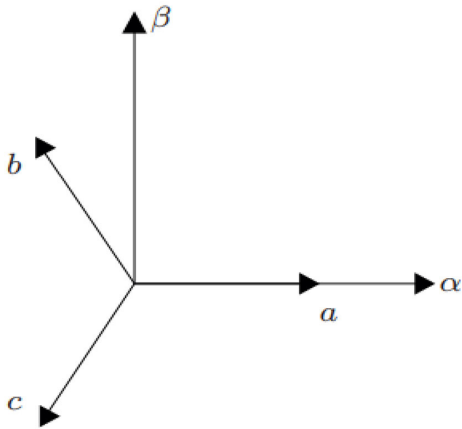


Рис. 4. Стационарные системы отсчета: abc и $\alpha-\beta$

Fig. 4. Stationary reference systems: abc and $\alpha-\beta$

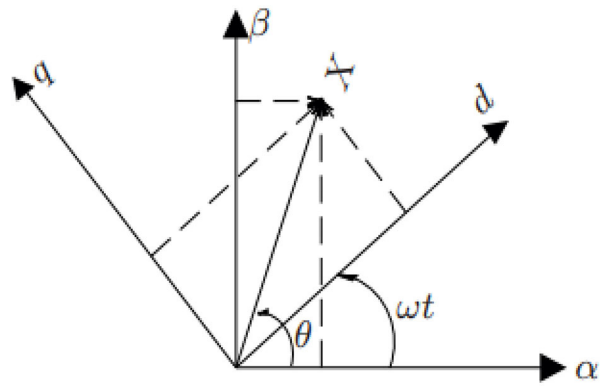


Рис. 5. Преобразование вектора между двухосными системами отсчета со смещением на угол ωt

Fig. 5. Transformation of a vector between biaxial reference systems with an offset by an angle ωt

Вектор в системе отсчета $\alpha-\beta$ может быть дополнительно выражен промежуточными частями другой двухфазной системы отсчета со сдвигом фазы на θ по отношению к системе отсчета $\alpha-\beta$. Новая система отсчета здесь называется системой отсчета $d-q$. Вектор, выраженный в системах отсчета $\alpha-\beta$ и $d-q$, показан на рис. 5.

Если k принять равным $\sqrt{2/3}$, рассчитанная мощность в системе отсчета $d-q$ будет иметь ту же величину, что и рассчитанная мощность в системе отсчета abc , и говорят, что преобразование является инвариантным по мощности. С другой стороны, если выбрано $k = 2/3$, амплитуда фазных напряжений как в системе отсчета $d-q$, так и в системе отсчета abc будет одинаковой, и говорят, что преобразование является инвариантным по отношению к напряжению. Мы обсудим математическое представление VSC в синхронно вращающейся $d-q$ системе отсчета. Однолинейная схема терминала VSC показана на рис. 6.

На рис. 6. L и r представляют собой суммарные индуктивность и сопротивление трансформатора и фазного реактора. Точка x – это ТОС системы переменного тока и VSC. Это точка отсчета для измерения величин переменного тока. $V_{x, abc}$ и $V_{c, abc}$ относятся к переменному напряжению в точках x и c соответственно. c – фиктивная точка измерения выходного напряже-

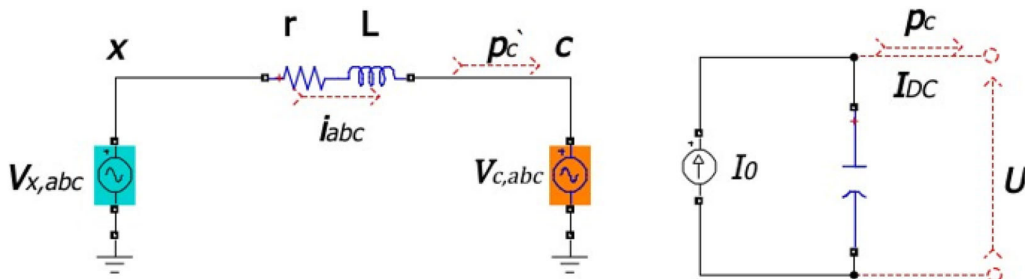


Рис. 6. Однострочное представление VSC

Fig. 6. Single line representation of VSC

ния преобразователя. Имейте в виду, что на практике невозможно измерить напряжение основной частоты ($V_{c, abc}$) непосредственно рядом с полупроводниками (в точке c) из-за присутствия в этом месте высокочастотных гармоник.

Теперь, если мы применим закон Кирхгофа о напряжении к точкам x и c , мы получим:

$$V_{x, abc} - V_{c, abc} = r i_{abc} + L \frac{di_{abc}}{dt}. \quad (13)$$

Применение инвариантного к напряжению преобразования Кларка дает:

$$V_{x, \alpha\beta} - V_{c, \alpha\beta} = r i_{\alpha\beta} + L \frac{di_{\alpha\beta}}{dt}. \quad (14)$$

Преобразование Парка $V_{x, \alpha\beta}$, $V_{c, \alpha\beta}$ и $i_{\alpha\beta}$, и abc задаются формулой:

$$\left. \begin{aligned} V_{x, \alpha\beta} &= V_{x, dq} e^{j\omega t} \\ V_{c, \alpha\beta} &= V_{c, dq} e^{j\omega t} \\ i_{\alpha\beta} &= i_{dq} e^{j\omega t} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где ω – рабочая частота сети переменного тока. Подставляя (15) в (14), получаем:

$$\left. \begin{aligned} V_{x, dq} e^{j\omega t} - V_{c, dq} e^{j\omega t} &= r i_{dq} e^{j\omega t} + L \frac{d(i_{dq} e^{j\omega t})}{dt} \\ r i_{dq} e^{j\omega t} + j\omega L i_{dq} e^{j\omega t} + e^{j\omega t} L \frac{di_{dq}}{dt} & \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Погружение всех слагаемых в (16) через $e^{j\omega t}$ приводит к:

$$V_{x, dq} - V_{c, dq} = r i_{dq} + j\omega L i_{dq} + L \frac{di_{dq}}{dt}. \quad (17)$$

Развернутая форма (17) после перестановки принимает вид:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{xd} \\ V_{xq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{cd} \\ V_{cq} \end{bmatrix} - r \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \omega l \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}. \quad (18)$$

$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$ является матричной формой мнимой единицы j и имеет эффект смещения векторов на 90° .

Обмен полной мощностью S , наблюдаемый из точки отсчета x и в системе отсчета $d - q$, определяется выражением:

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{3}{2} V_{x, dq} i_{dq}^* \\ &= \frac{3}{2} (V_{xd} + jV_{xq})(i_d - j i_q) \\ &= \frac{3}{2} \{ (V_{xd} i_d + V_{xq} i_q) + j(V_{xq} i_d - V_{xd} i_q) \} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

В установившемся режиме обмен активной мощностью P' на стороне переменного тока (в ТОС) будет равен обмену мощностью на шине постоянного тока P_C (без учета потерь в полупроводнике и фильтре). Это математически дается следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} P'_c &= P_c \\ \frac{3}{2} (V_{xd} i_d + V_{xq} i_q) &= U I_{DC} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Из уравнения (20) постоянный ток в установившемся режиме принимает вид:

$$I_{DC} = \frac{p_c'}{U} = \frac{3(V_{xd}i_d + V_{xq}i_q)}{2U}. \quad (21)$$

Преобразователь, если смотреть со стороны сети постоянного тока, будет источником постоянного тока величиной I_{DC} . Когда активная сеть переменного тока подключена к VSC, использование системы отсчета $d - q$ в конструкции и реализации управления позволяет осуществить полностью развязанное линейное управление активным и реактивным токами.

Система отсчета $d - q$ выбирается таким образом, что ось d совмещена с вектором напряжения фазы-А точки x . Это означает, что PLL должен быть синхронизирован по фазе с вектором напряжения фазы А опорной точки x [15]. Это приводит к:

$$\left. \begin{array}{l} V_{xd} = V_x \\ V_{xq} = 0 \end{array} \right\}. \quad (22)$$

Следовательно, активная мощность (P) и реактивная мощность (Q) VSC, измеренные в ТОС (точка x), становятся следующими:

$$\left. \begin{array}{l} P_c' = \frac{3}{2} V_{xd}i_d \\ Q_{dq} = -\frac{3}{2} V_{xd}i_q \end{array} \right\}. \quad (23)$$

Преобразователь имеет задержку из-за модулятора ширины синусоидального импульса. Пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы используются для управления с обратной стороны контура, а нули ПИ-регуляторов выбираются для отмены доминирующего полюса (внешняя петля). Для типичного VSC постоянная времени из-за последовательного фильтра, $\tau = L/r$, намного выше, чем задержка переключения, и, следовательно, будет доминирующим полюсом, который будет компенсирован нулем ПИ-регулятора. Токи перекрестной связи в (18) компенсируются условиями прямой связи в регуляторах, как показано на рис. 7б. i_d^* и i_q^* – опорные токи для регуляторов тока оси d и оси q соответственно.

Опорные напряжения внутреннему контуру управления током поступают от двух внешних контуров управления [16]. Первый внешний контур управления состоит либо из управления напряжением постоянного тока, либо из управления активной мощностью, а второй контур состоит либо из управления напряжением переменного тока, либо из управления реактивной мощностью [17]. Активный ток (i_d^*) используется для управления либо активной мощностью, либо уровня постоянного напряжения. Точно так же реактивный ток (i_q^*) используется для управления либо потоком реактивной мощности в жестком подключении к сети, либо поддержкой переменного напряжения в слабом подключении к сети [18].

3. Управление активной мощностью

Активная мощность из (23) определяется выражением:

$$P = \frac{3}{2} V_{xd}i_d. \quad (24)$$

Потоком активной мощности можно управлять с помощью активного тока (i_d), как показано на рис. 8.

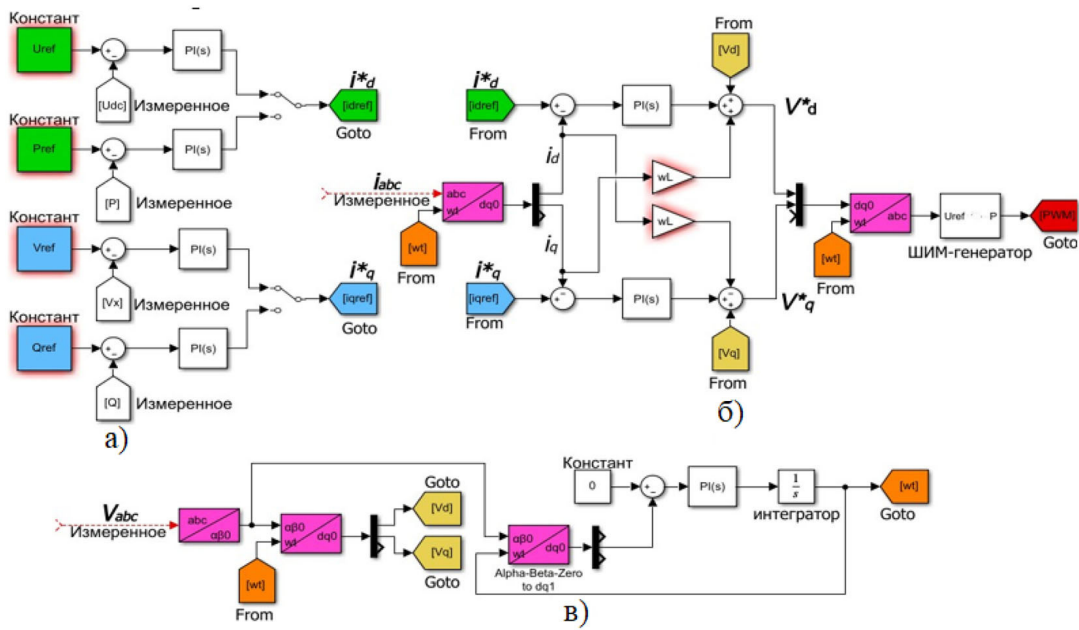


Рис. 7. а) внешний контур управления; б) внутренний контур управления током; в) контур фазовой автоподстройки (PLL)

Fig. 7. а) external control loop; б) internal current control circuit; в) phase locked loop (PLL)

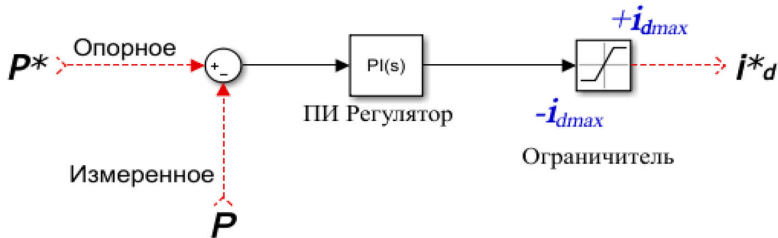


Рис. 8. ПИ-регулятор для управления активной мощностью

Fig. 8. PI Regulator for active power control

Чтобы ограничить величину тока в VSC в допустимом диапазоне, за выходом регулятора активной мощности следует функция ограничителя с пределами $\pm i_{dmax}$ [19]. Номинальная амплитуда однофазного тока определяет этот предел как:

$$i_{max} = i_N. \tag{25}$$

4. Управление реактивной мощностью

Реактивная мощность из (23) определяется выражением:

$$Q_{dq} = -\frac{3}{2} V_{xd} i_q. \tag{26}$$

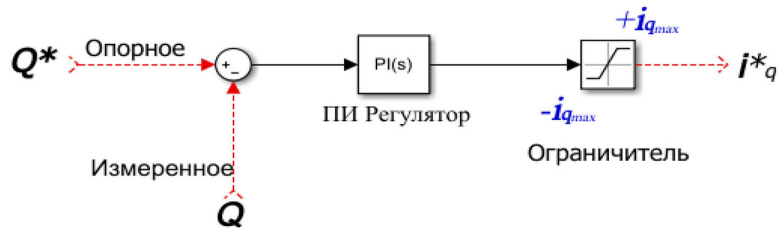


Рис. 9. ПИ-регулятор для управления реактивной мощностью

Fig. 9. PI Regulator for reactive power control

Реактивная мощность управляется реактивным током (i_q) и реализуется, как на рис. 9. Как и в случае управления активной мощностью, i_q^* будет опорным входом для управления реактивного тока внутреннего контура управления током на рис. 7б.

i_q^* ограничен до $\pm i_{qmax}$ таким образом, чтобы общий ток преобразователя ($|\pm i_{qmax}|$) не превышал номинальный ток (i_N). Приоритет часто отдается передаче активной мощности, а не реактивной мощности [19], [20]. Следовательно, предел реактивного тока становится:

$$i_{q,max} = \sqrt{i_N^2 - i_d^{*2}}. \quad (27)$$

5. Управление напряжением на шине постоянного тока

Постоянное напряжение с (20) и (23) определяется выражением:

$$\left. \begin{aligned} P_c' &= P_c \\ \frac{3}{2} V_{xd} i_d &= U I_{DC} \\ U &= \frac{3 V_{xd} i_d}{2 I_{dc}} \end{aligned} \right\}. \quad (28)$$

Из уравнения (28) видно, что постоянным напряжением можно управлять путем управления активным током (i_d), как показано на рис. 10.

ПИ-регулятор напряжения постоянного тока позволяет поддерживать постоянное напряжение на шине постоянного тока (равное опорному напряжению постоянного тока U^*) независимо от колебаний потока мощности через VSC до тех пор, пока поток мощности находится в пределах пропускной способности терминал VSC-HVDC [19], [21].

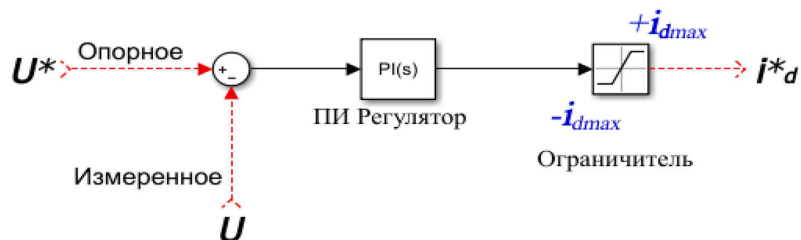


Рис. 10. ПИ-регулятор для управления постоянным напряжением

Fig. 10. PI Regulator for direct voltage control

6. Управление снижением напряжения постоянного тока

В разделах 3 и 5 было показано, что управление как активной мощностью, так и постоянным напряжением достигается за счет управления активным током i_d^* . Если объединить два типа управления, то получится управление снижения постоянного напряжения, показанного на рис. 11 [22].

Регулятор снижения напряжения постоянного тока характеризуется потоком мощности, который изменяется линейно с изменениями напряжения на шине постоянного тока [23]. Постоянная RDC на рис. 11 представляет собой коэффициент передачи по напряжению постоянного тока.

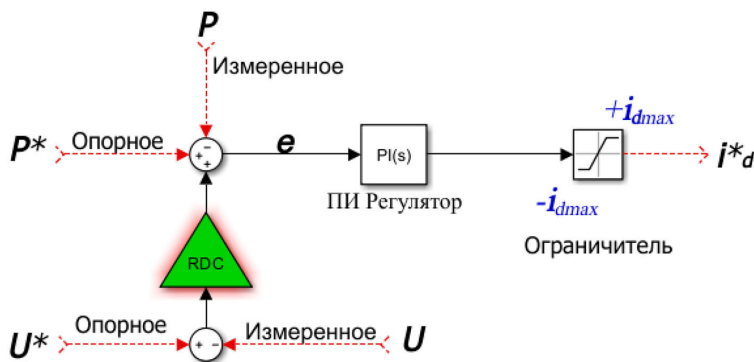


Рис. 11. Регулятор снижения постоянного напряжения

Fig. 11. DC voltage reduction regulator

Коэффициент передачи по напряжению постоянного тока может быть определен как увеличение мощности в МВт, подаваемой в цепь постоянного тока, в ответ на падение напряжения на шине постоянного тока 1 кВ.

7. Управление напряжением переменного тока

Напряжение переменного тока с (22) и (23) определяется выражением:

$$\left. \begin{aligned} V_x &= V_{xd} \\ V_{xd} &= \frac{2}{3} \frac{P}{i_d} \\ V_{xd} &= \frac{2}{3} \frac{Q}{i_q} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Из уравнения (29) видно, что переменным напряжением можно управлять путем управления активным током (i_d), или реактивным током (i_q). Поскольку активный ток (i_d) используется для управления активной мощностью отдельно, поэтому переменное напряжение управляется реактивным током (i_q) [24], как показано на рис. 12.

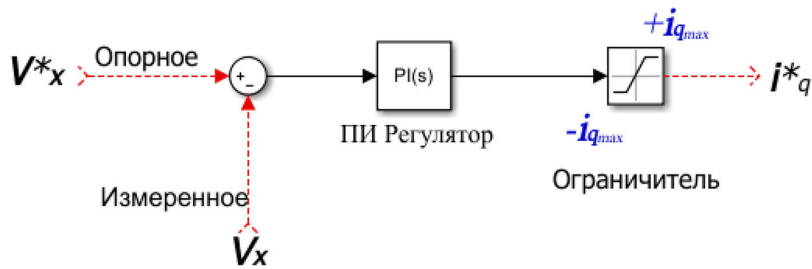


Рис. 12. ПИ-регулятор напряжения переменного тока

Fig. 12. PI Regulator of AC voltage

8. Характеристики напряжения и активной мощности для различных режимов управления терминалом VSC-HVDC

Характеристика напряжения постоянного тока терминала VSC-HVDC определяется типом внешнего контура управления, используемого для обеспечения опорного активного тока (i_d^*) внутреннего контура управления током [25]. Ранее обсуждалось, что существует три возможных варианта внешнего контура активного тока, а именно: контур управления активной мощностью, контур управления постоянным напряжением и контур управления снижением напряжения постоянного тока.

8.1. Характеристика U и P для режима управления активной мощностью:

Управление активной мощностью и соответствующая ему характеристика постоянного напряжения показаны на рис. 13.

Характеристики напряжения постоянного тока режима управления активной мощностью таковы, что поток мощности через терминал VSC-HVDC (P) остается постоянным и равным опорной мощности (P^*) независимо от уровня напряжения постоянного тока (U) [26].

Из-за определенного направления потока тока при разработке управления активного тока в разделе 2 положительный поток мощности соответствует режиму работы выпрямителя, а отрицательный поток мощности соответствует режиму работы инвертора.

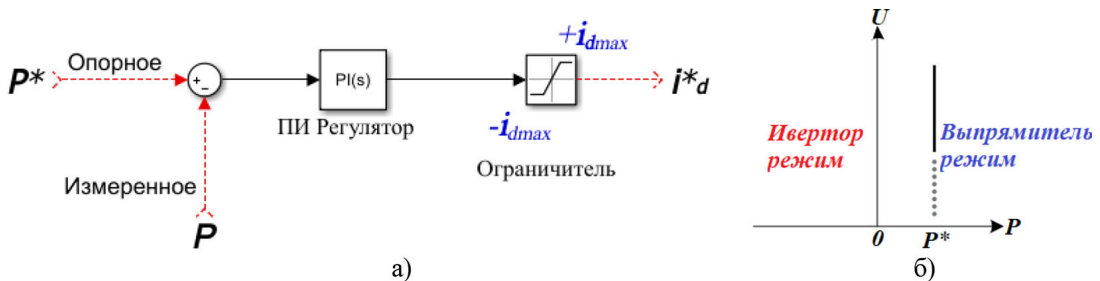


Рис. 13. Управление активной мощностью: а) схема управления б) характеристики напряжения постоянного тока

Fig. 13. Active power control: a) control circuit; б) DC voltage characteristics

8.2. Характеристика U и P для режима управления постоянным напряжением:

Управление постоянным напряжением и его характеристики показаны на рис. 14.

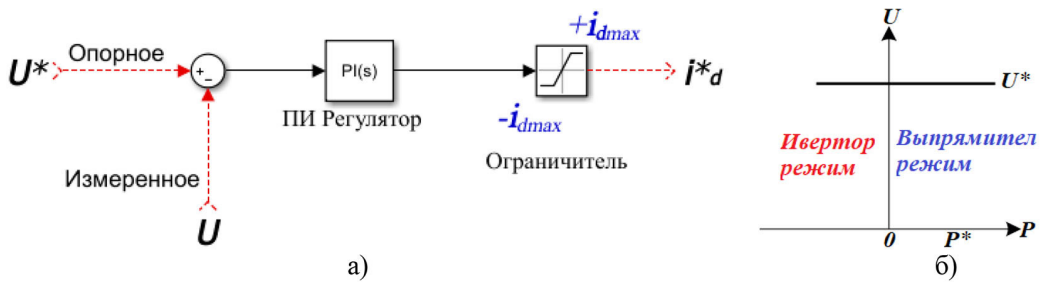


Рис. 14. Управление постоянным напряжением: а) схема управления; б) характеристики постоянного напряжения

Fig. 14. DC voltage control: а) control circuit; б) DC voltage characteristics

Характеристики напряжения постоянного тока режима управления постоянным напряжением таковы, что постоянное напряжение терминала VSC- HVDC (U) остается постоянным и равным опорному напряжению (U^*) независимо от передаваемой мощности (P).

8.3. Характеристика U и P для режима управления снижением напряжения постоянного тока:

Управление снижением напряжением постоянного тока и его характеристики показаны на рис. 15.

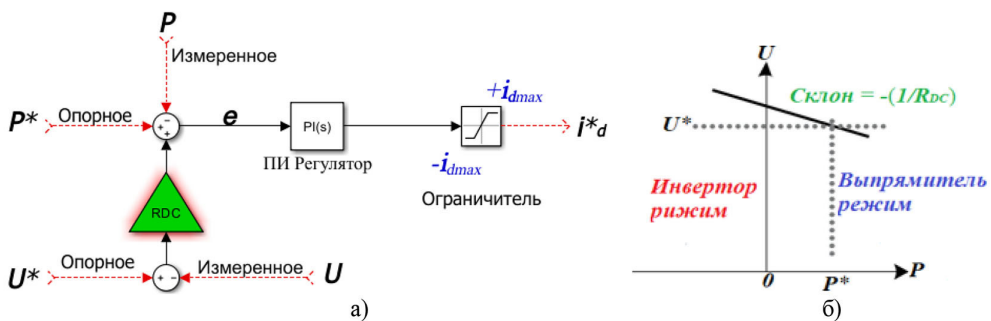


Рис. 15. Управление снижением напряжения постоянного тока: а) схема управления; б) характеристики напряжения постоянного тока

Fig. 15. DC voltage reduction control: а) control circuit; б) DC voltage characteristics

Склон характеристики снижения постоянного напряжения может быть задан промежуточными значениями коэффициента передачи по напряжению постоянного тока (RDC).

Предполагая, что используется пропорционально-интегральный ПИ-регулятор, установившийся сигнал ошибки регулятора снижения напряжения постоянного тока e равен нулю, следовательно, мы получаем уравнение:

$$P^* - P + RDC(U^* - U) = e = 0. \quad (30)$$

Установившиеся соотношения всех трех рассмотренных выше возможных режимов управления действительно могут быть представлены уравнением установившегося режима (30). Для режима управления активной мощностью коэффициент передачи по напряжению постоянного тока ($RDC = 0$). С другой стороны, для режима управления постоянным напряжением коэффициент передачи по напряжению постоянного тока ($RDC = \infty$) [27].

Выводы

В данной работе объяснялись типы пассивного и активного подключения VSC к сети переменного тока, внутренний и внешний контур управления для активного подключения к сети и различные конфигурации управления для терминала VSC-HVDC: управление активной мощностью; управление реактивной мощностью; управление напряжением на шине постоянного тока; управление снижением напряжения постоянного тока; управление напряжением переменного тока. Также обсуждались характеристики U и P трех типов режимов управления VSC-HVDC.

Список литературы / References

- [1] Zehong L., Jun Y., Xianshan G., Tao S., Jin Z., Survey of Technologies of Line Commutated Converter Based High Voltage Direct Current Transmission in China, *J. CSEE. Power and Energy Systems.*, 2015, 1(2), 1–8.
- [2] 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 S., Vidineev A. 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.)].
- [3] Плесконос Л.В., Ефремов М.Ю. Электрическое поле линий электропередач постоянного тока. *Журнал Юго-Западного государственного университета*, 2019, 9(2), 35–46 [Pleskonos L. V., Efremov M. Y. Electric Field Linesdc Transmission, *J. Southwest State University.*, 2019, 9(2), 35–46 (in Rus.)].
- [4] Bahrman M., Johnson B. The ABCs of HVDC transmission technologies, *J. IEEE. Power.*, 2007, 5(2), 32–44.
- [5] Honglin Z., Geng Y., Jun W. Modeling, analysis, and control for the rectifier of hybrid HVdc systems for DFIG-based wind farms, *J. IEEE. Energy.*, 2011, 26(1), 53–62.
- [6] Zhou H., Yang G., Wang J., Geng H. Control of a hybrid high-voltage DC connection for large doubly fed induction generator-based wind farms, *J. IET. Power.*, 2011, 5(1), 36–47.
- [7] Xu Z., Wang S., Xiao H. Hybrid high-voltage direct current topology with line commutated converter and modular multilevel converter in series connection suitable for bulk power overhead line transmission, *J. IET. Power Electron.*, 2016, 9(12), 17–23.

- [8] Biyadgie A., Mohamed S., Ehab F. Enhanced DC Voltage Regulation and Transient Response for Multi-Terminal VSC-HVDC System Using Direct Power Control, *J. IEEE. Transactions on power systems.*, 2022, 37(4), 2538–2548.
- [9] Renxin Y., Gang S., Xu C., Chen Z., Gen L., Jun L. Autonomous Synchronizing and Frequency Response Control of Multi-terminal DC Systems with Wind Farm Integration, *J. IEEE. Transactions on sustainable energy.*, 2020, 11(4), 2504–2514.
- [10] Lidong Z., Lennart H., Hans P.N., Modeling and Control of VSC-HVDC Links Connected to Island Systems, *J. IEEE. Transactions on Power Systems.*, 2011, 26(2), 783–793.
- [11] Luis M., Enrique A. A Unified Modeling Approach of Multi-Terminal VSC-HVDC Links for Dynamic Simulations of Large-Scale Power Systems. *J. IEEE. Transactions on Power Systems.*, 2016, 31(6), 5051–5060.
- [12] Kunjumuhammed L., Pal B., Gupta R., Dyke K. Stability Analysis of a PMSG-Based Large Offshore Wind Farm Connected to a VSC-HVDC, *J. IEEE. Trans. Energy Convers.*, 2017, 32(3), 76–85.
- [13] Beza M., Bongiorno M., Stamatiou G. Analytical derivation of the AC-side input admittance of a modular multilevel converter with open and closed-loop control strategies, *J. IEEE. Trans. Power Del.*, 2018, 33(1), 248–256.
- [14] Ricardo M., Claudio R., Boris A., Alcaide M., Enrique A. A VSC-based Model for Power Flow Assessment of Multi-terminal VSC-HVDC Transmission Systems, *J. Modern power systems and clean energy.*, 2021, 9(6), 1363–1374.
- [15] Zhang X., Xia D., Fu Z. An improved feedforward control method considering PLL dynamics to improve weak grid stability of grid-connected inverters, *J. IEEE. Transactions on Industry Applications.*, 2018, 54(5), 5143–5151.
- [16] Mohamed A.K., Radouane M., Adnane E., Ibrahim B., Nadia M. Control and Protection of Hybrid LCC–VSC HVDC Transmission System based on VDCOL Strategy, *J. International Journal on Electrical Engineering and Informatics.*, 2022, 14(1), 204–223.
- [17] Zhou L., Ziang W., Ruopei Z., Yazhou L., Tang Y., Xiao Z. Frequency Support Control Method for Interconnected Power Systems Using VSC–MTDC, *J. IEEE. Transactions on Power Systems.*, 2021, 36(3), 2304–2313.
- [18] Jun L., Tianjun J., Gomis O., Ekanayake J., Jenkins N. Operation and control of multiterminal HVDC transmission for offshore wind farms, *J. IEEE. Trans. Power.*, 2011, 26(4), 2596–2604.
- [19] Rouzbehi K., Candela J.I., Luna A., Gharehpetian G.B., Rodriguez P. Flexible control of power flow in multiterminal dc grids using DC–DC converter, *J. IEEE. Power Electron.*, 2016, 4(3), 1135–1144.
- [20] Rouzbehi K., Zhang W., Candela J.I., Luna A., Rodriguez P. Unified reference controller for flexible primary control and inertia sharing in multi-terminal voltage source converter-HVDC grids. *J. IET. Gener. Transmiss. Distrib.*, 2017, 11(3), 750–758.
- [21] Rao H. Architecture of Nanao multi-terminal VSC-HVDC system and its multi-functional control. *J. Power Energy Syst.*, 2015, 1(1), 9–18.
- [22] Raza A., Dianguo X., Yuchao L., Xunwen S., Williams B.W., Cecati C. Coordinated operation and control of VSC based multiterminal high voltage DC transmission systems, *J. IEEE. Trans. Sustain. Energy.*, 2016, 7(1), 364–373.

[23] Pinto R. T., Bauer P., Rodrigues S.F., Wiggelinkhuizen E.J., Pierik J., Ferreira B. A novel distributed direct-voltage control strategy for grid integration of offshore wind energy systems through MTDC network, *J. IEEE. Trans. Ind. Electron.*, 2013, 60(6), 2429–2441.

[24] Yanbo C., Wenxun L., Xialin L., Jinhuan Z., Shengnan L., Xinze X. An Improved Coordinated Control Strategy for PV System Integration with VSC–MVDC Technology, *J. Energies.*, 2017, 10(10), 1–14.

[25] Shagufta K., Suman B. A comprehensive power-flow model of multi terminal PWM based VSC-HVDC systems with DC voltage droop control, *J. Elsevier. Electrical Power and Energy Systems.*, 2018, 102, 71–83.

[26] Cao J., Du W., Wang H. Minimization of transmission loss in meshed AC/DC grids with VSC–MTDC networks, *J. IEEE. Trans. Power. Syst.*, 2013, 28(3), 55–67.

[27] Dimitrije K., Predrag S. Optimal power flow control in the system with offshore wind power plants connected to the MTDC network, *J. Elsevier. Electrical Power and Energy Systems.*, 2018, 105, 142–150.