УДК 621.314.316

Система управления магистральной линией электропередачи постоянного тока с модульными многоуровневыми преобразователями

М.ХИМЕНЕЗ КАРРИЗОСА¹, Н.СТАНКОВИЧ², Ж.-К.ВАНЬЕ³, Я.Э.ШКЛЯРСКИЙ⁴, А.И.БАРДАНОВ⁴✉

¹ Мадридский политехнический университет, Центр энергетики, Мадрид, Испания

² Электриситэ де Франс, Париж, Франция

³ Высшая школа электротехники, Париж, Франция

⁴ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

В статье представлена философия построения систем управления магистральными линиями электропередачи постоянного тока, входящими в состав сетей переменного тока. Такие линии электропередачи по сравнению с магистральными линиями электропередачи переменного тока обладают лучшей пропускной способностью и обеспечивают меньшие потери напряжения на больших расстояниях электропередачи. Это особенно актуально в условиях разработки полезных ископаемых российского севера и арктического шельфа. В этих регионах России энергосистема не развита, поэтому для присоединения технологических комплексов к ЕЭС требуются линии электропередачи большой протяженности. Для управления магистральной линией электропередачи постоянного тока предлагается многоуровневая система управления, разделенная на локальный, первичный и вторичный уровни управления, подчиненные друг другу по иерархическому принципу. Предлагаемая стратегия управления была опробована на масштабированной модели магистральной линии электропередачи постоянного тока с тремя присоединениями к сети переменного тока. Одно из указанных присоединений реализовано на основе модульного многоуровневого преобразователя (ММП), включающего пять подмодулей на плечо. Рассматривается метод построения оптимальных контуров регулирования переменного и циркулирующего токов ММП на основе недавно предложенной математической модели преобразователя. Два остальных присоединения реализованы на основе трехуровневых сетевых инверторов, работающих в режиме источника напряжения (ИИН). Для управления ими используется новый вариант настройки ПИ-регуляторов, позволяющий адаптировать значения пропорционального и интегрального коэффициентов регулятора по отношению к измеряемым переменным. Для управления системой на первичном уровне выбрана методика статического регулирования. Для регулирования на вторичном уровне предлагается новый метод формирования потока мощности. В рамках проверки надежности предлагаемой стратегии управления вся система испытывалась как в нормальном режиме, так и при наличии возмущений.

Ключевые слова: модульный многоуровневый преобразователь; вставка постоянного тока; формирование потока мощности; сетевые инверторы; линии постоянного тока; статическое регулирование; многоуровневое регулирование

Как цитировать эту статью: Система управления магистральной линией электропередачи постоянного тока с модульными многоуровневыми преобразователями / М.Хименез Карризоса, Н.Станкович, Ж.-К.Ванье, Я.Э.Шклярский, А.И.Барданов // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 357-370. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.357

Введение. Высоковольтные сети постоянного тока (HVDC) все чаще применяются для передачи и распределения энергии. В некоторых случаях они являются многообещающей альтернативой системам переменного тока, например при интеграции возобновляемых источников электроэнергии или при соединении сетей переменного тока, работающих с разными частотами. Распространение линий постоянного тока тесно связано с бурным развитием силовой электроники и полупроводниковых приборов в последние несколько лет [14, 16]. Особый интерес представляет возможность передачи таким образом электроэнергии на большие расстояния с меньшими потерями напряжения, что актуально при разработке полезных ископаемых на российском севере. В настоящее время эти задачи решаются путем построения изолированных энергосистем. Возможность присоединения таких систем к сетям единой энергосистемы позволит решить важную стратегическую задачу обеспечения устойчивого развития энергосистемы в регионах добычи полезных ископаемых.

Несмотря на ряд достоинств, подавляющее большинство систем HVDC имеет только два присоединения (в начале и в конце линии, работают в режиме «спина к спине»). Вот некоторые примеры таких линий постоянного тока, функционирующих в настоящее время: одна из старейших высоковольтных вставок постоянного тока на острове Готланд (1954), расположенном на восточном побережье Швеции, которая могла передавать 20 МВт на более чем 98 км по подводным кабелям с напряжением 100 кВ [27], недавно введенная в эксплуатацию линия постоянного тока INELFE (2015) с номинальной мощностью более 1000 МВт, связывающая Францию и Испанию [14]. С другой стороны, в настоящее время существует только несколько магистральных

высоковольтных линий постоянного тока высокого напряжения: это линия электропередачи Квебек – Новая Англия (1991) с номинальной мощностью 2250 МВт и напряжением 450 кВ; линия Сардиния – Корсика – Италия (1992) с номинальной мощностью 300 МВт, 304 км и номинальным напряжением 200 кВ. Обе линии имеют только три присоединения и работают в режиме нескольких магистральной линии в течение ограниченного времени [12, 26].

Сейчас полностью введены в эксплуатацию две магистральные высоковольтные линии постоянного тока (MT-HVDC – Multi terminals high voltage direct current) в Китае – линия НанАо городского округа Шаньтоу с тремя присоединениями и линия на архипелаге Чжоушань с пятью присоединениями [13].

Дальнейшее развитие магистральных линий постоянного тока требует новых решений двух основных задач: 1) организация взаимодействия различных устройств в системе (вопрос взаимодействия регуляторов различных устройств в настоящее время не разработан); 2) организация систем защиты в сетях постоянного тока (технология автоматических выключателей постоянного тока не полностью готова к использованию).

Поскольку магистральные линии постоянного тока подключены к основной сети переменного тока, очевидно, что одним из важнейших устройств в системе будет преобразователь переменного тока в постоянный. На протяжении всей истории работы высоковольтных линий постоянного тока для этого использовались различные типы преобразователей и полупроводниковых устройств. Первые преобразователи работали по технологии ртутных дуговых вентилей, которые были известны как преобразователи, управляемые напряжением (ПУН). Позже на замену ртутным вентилям в ПУН пришли тиристоры. Однако, поскольку даже в этом случае в работе ПУН сохранялись некоторые ограничения, сейчас в линиях переменного тока получили распространение полностью управляемые сетевые инверторы на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), работающие в режиме источника напряжения (ИИН). В последние годы становится популярной новая топология внутри семейства ИИН – модульный многоуровневый преобразователь (ММП) [7, 11, 17, 28]. Основными преимуществами ММП являются низкий коэффициент гармонических искажений токов и напряжений из-за многоуровневой конфигурации, отсутствие необходимости в конденсаторе большой емкости в звене постоянного тока, быстрая реакция на изменения уровня постоянного напряжения, выбор режима работы по требуемому потоку мощности, а также возможность осуществлять выключение на стороне постоянного тока [6, 10, 18].

В статье представлена полная схема управления магистральной высоковольтной линией электропередачи постоянного тока, эффективность которой подтверждена результатами экспериментов. Предлагаемый способ управления апробирован на масштабированной модели магистральной высоковольтной линии постоянного тока с тремя присоединениями. Система управления включает три разных уровня управления в разных масштабах времени [6, 8]. Масштабированная линия электропередачи постоянного тока состоит из ММП (пять подмодулей на плечо) и двух трехуровневых ИИН. Основные результаты исследования могут быть сведены к следующему:

- предложен новый метод оптимальной настройки регуляторов переменного тока и циркулирующего тока ММП на основе разработанной математической модели;
- проведена экспериментальная проверка работы нового алгоритма для решения проблемы формирования потока мощности в сетях переменного (постоянного) тока;
- разработана и проверена система подчиненного, многоуровневого регулирования для магистральных линий постоянного тока, которая включает в себя как регуляторы реального времени, так и управление всей системой передачи электроэнергии.

Структура системы управления. Система управления, предложенная в статье, разделена на три различных уровня, работающие с различными масштабами времени.

Регуляторы местного уровня. Локальные регуляторы отвечают за управление преобразователями переменного тока в постоянный. Масштаб времени регуляторов этого типа составляет порядка миллисекунд. В книге [4] рассмотрено множество топологий сетевых инверторов, однако мы сосредоточимся только на двухуровневых ИИН и ММП.

ИИН представляют собой систему подчиненного регулирования, где регуляторы настраиваются в соответствии с динамикой переменных, которые нужно контролировать (напряжение на конденсаторе постоянного тока и линейные токи трехфазной сети). Выделяют два контура регулирования: внутренний, более быстрый, отвечает за управление токами трехфазной сети, внеш-

ний регулирует напряжение на конденсаторе [9]. С другой стороны, ИИН могут решать две различные задачи:

- управление постоянным напряжением и реактивной мощностью (задание получают как внутренний, так и внешний регулятор);
- управление активной и реактивной мощностью, задействован только внутренний контур регулирования.

Из-за возникающих в ММС колебаний тока одной из основных задач управления является уменьшение циркулирующих токов, поскольку они искажают напряжение на конденсаторах, увеличивая потери в преобразователе.

Регуляторы ИИН (контроль напряжения и реактивной мощности). Существует две разные динамики в локальном контроллере: динамика изменения напряжения на конденсаторе постоянного тока U_C и динамика изменения тока фазных реакторов, которые связаны с реактивной мощностью Q . При этом задание получают оба контура регулирования.

В литературе представлены многочисленные исследования этого типа управления. Например, «линейное» гистерезисное управление вокруг точки равновесия (для каждой динамической петли используются разные ПИ-регуляторы) [9], или полностью нелинейное управление, в котором управление возможно для любых значений, которые принимают регулируемые переменные (или внутри некоторой рабочей области определенной аналитически) [21]. В обоих случаях часто используется преобразование Парка [23] и применяется вращающаяся dq -система координат.

Для управления ИИН было решено использовать dq систему координат, классическую широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) и новый вариант линейного ПИ-регулятора, который позволяет адаптировать значения P и I коэффициентов регулятора в зависимости от измеренных локальных переменных. Регулятор реализован следующим образом.

В dq системе координат модель ИИН в точке подключения 1 выражается системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_f}{L_f}i_d - \omega i_q - \frac{M_d}{L}u_C + \frac{U_d}{L_f}; \\ \frac{di_q}{dt} = \omega i_d - \frac{R_f}{L_f}i_q - \frac{M_q}{L}u_C + \frac{U_q}{L_f}; \\ \frac{du_C}{dt} = \frac{3M_d}{2C}i_d + \frac{3M_q}{2C}i_q - \frac{1}{R_{DC\,grid}C}u_C, \end{cases} \quad (1)$$

где R_f и L_f – сопротивление и индуктивность дросселей, требуемых для формирования переменных токов; C – емкость конденсатора в звене постоянного тока; M_d и M_q – глубина широтно-импульсной модуляции; ω – частота переменного напряжения; R_{DC} – эквивалентное сопротивление стороны постоянного тока, определенное для эквивалентного контура Тевенена (все эти значения представлены в табл.1); i_d и i_q – координаты обобщенного вектора токов системы во вращающейся системе координат; u_C – напряжение конденсатора в звене постоянного тока.

В системе уравнений (1) i_d и i_q взаимосвязаны. Устранить эффект перекрестных связей можно путем добавления в соответствующие уравнения составляющих

$$M_d = M'_d + \frac{L\omega}{u_C}i_q; \quad M_q = M'_q + \frac{L\omega}{u_C}i_d.$$

Регулятор внутреннего контура ИИН. Внутренний контур управляет переменным током. Учитывая, что i_d и i_q ортогональны, реактивная мощность может полностью контролироваться переменной i_q . Таким образом, если преобразователь моделируется как система первого порядка с усилением $u_C/2$ и постоянной времени T_g (эта задержка связана с частотой треугольного сигнала ШИМ) и с учетом параметров ПИ-регулятора (K_{pq} и T_{iq}), то контур управления можно представить на рис.1, а.

Следовательно, передаточная функция разомкнутого контура:

$$H(s) = \frac{u_C}{2} \left(\frac{1}{1+T_g s} \right) \frac{1}{R_f + L_f s} K_{pq} \left(1 + \frac{1}{T_{iq} s} \right). \quad (2)$$

Таблица 1

Параметры системы		
Условное обозначение	Параметр	Величина
Система постоянного тока		
U_{DC}	Номинальное постоянное напряжение	150 В
P_{DC}	Номинальная мощность	4 кВт
Параметры линии постоянного тока		
R_1	Активное сопротивление первого участка	0,6 Ом
L_1	Индуктивность первого участка	10 мГн
R_2	Активное сопротивление второго участка	0,6 Ом
L_2	Индуктивность второго участка	10 мГн
R_3	Активное сопротивление третьего участка	0,6 Ом
L_3	Индуктивность третьего участка	10 мГн
LC – фильтр		
L_f	Индуктивность фильтра 1	20 мГн
C_f	Емкость фильтра 1	0,4 мФ
L_f^2	Индуктивность фильтра 2	20 мГн
C_f^2	Емкость фильтра 2	0,4 мФ
Преобразователи типа ИИП		
$U_{ИИП \max}$	Амплитуда напряжения	750 В
$I_{ИИП \max}$	Амплитуда тока	30 А
C	Конденсатор переменного тока	0,1 Ф
Модульный многоуровневый преобразователь		
N	Число подмодулей на плечо	5
C_i	Емкость конденсатора в подмодуле	0,1 Ф
R_{AC}	Сопротивление на стороне постоянного тока	10 Ом
L_{AC}	Индуктивность на стороне постоянного тока	0,1 Гн
Параметры сети переменного тока		
U_{AC}	Линейное напряжение	127 В
ω	Частота напряжения	$2\pi \cdot 50$ рад/с
Параметры реакторов на стороне переменного тока		
R_f	Активное сопротивление	0,142 Ом
L_f	Индуктивность	0,01 Гн
Понижающие трансформаторы		
n	Коэффициент трансформации	127/50
S_n	Полная мощность	3,5 кВА
R_f	Эквивалентное активное сопротивление сердечника	221 Ом
ωL	Эквивалентное реактивное сопротивление сердечника	41 Ом
$U_{кз}$	Напряжение короткого замыкания	5,7 В
Сглаживающие фильтры		
f_s	Частота дискретизации	1000 Гц
R_{fanty}	Активное сопротивление фильтра	3,38 кОм
C_{fanty}	Емкость фильтра	47 нФ

Рис.1. Контур регулирования q -составляющей тока (а), напряжения (б), d -составляющей тока (в)

Применяя классические методы настройки ПИ-регулятора, можно определить пропорциональную и интегральную составляющие, обеспечивающие на некоторой частоте ω_c запас по фазе 60° , и модуль передаточной функции $|H(s)|$, равный единице, чтобы гарантировать устойчивость:

$$K_{pq} = \frac{2L_f \omega_c \sqrt{1 + (T_g \omega_c)^2}}{u_C}, \quad (3)$$

где ω_c – критическая частота, соответствующая параметрам, представленным в табл.1, и обеспечивающая запас по фазе 60° . Также важно отметить, что в уравнении (3) K_{pq} зависит от u_C . Следовательно, этот параметр должен быть адаптирован в соответствии с напряжением в линии постоянного тока.

Регулятор внешнего контура ИИН. Внешний контур отвечает за управление напряжением на конденсаторе в звене постоянного тока. Из третьего уравнения системы уравнений (1) следует, что u_C зависит от i_d , из рис.1, б видно, что u_C влияет на внутренний контур управления.

Поскольку R_f и L_f не меняются, то критическая частота ω_c остается такой же, как и для внутреннего регулятора. Для расчета П и И параметров регулятора применены те же методы, что и в предыдущем случае и, соответственно получены аналогичные выражения для K_{pd} и T_{id} . После расчета параметров регулятора и, учитывая, что динамика изменения i_d намного выше, чем u_C , можно выполнять регулировку параметров управления K_{u_C} и T_{u_C} в соответствии с теорией «внутренней модели» [22, 24].

Регулирование активной и реактивной мощности ИИН. В этом случае будет регулироваться P и контролироваться Q . Динамика изменения переменных ИИН описывается системой уравнений (1). С точки зрения управления единственная разница с контроллером, рассмотренным ранее, заключается в том, что в нем нет контура управления напряжением, а i_{dref} задается непосредственно контроллером верхнего уровня (рис.1, в).

Система управления ММП. Стратегия управления ММП представлена на рис.2. Контур регулирования содержит регулятор выходного тока и регулятор циркулирующего тока. Опорный сигнал для регулятора выходного тока формируется наблюдателем, в то время как задание величины циркулирующего тока формируется методом оптимизации на основе модели, предложенной в [19], где учитывается совокупная и разностная энергия емкости в каждом плече (W^Σ и W^Δ).

Дискретная математическая модель выходного тока описывается следующим уравнением [3]

$$i_{sk+1} = \left(1 - T \frac{R + 2R_g}{L + 2L_g} \right) i_{sk} + \frac{2T}{L + 2L_g} u_{sk} - \frac{2T}{L + 2L_g} (u_{gk} + u_{nmk}), \quad (4)$$

где T – постоянная времени; u_g – фазное напряжение стороны переменного тока; R_g и L_g – соответственно сопротивление и индуктивность линии переменного тока.

Рис.2. Блок-диаграмма системы управления ММП

Уравнение (4) получено с учетом следующих замен переменных:

$$i_s = i_u - i_l, \quad (5)$$

$$u_s = \frac{u_l - u_n}{2}. \quad (6)$$

Индексы k и $k + 1$ указывают значения соответствующих переменных в два последовательных момента времени. Напряжение между нейтралью n и средней точкой шины постоянного тока m обозначается u_{nm} , и его можно рассматривать как ограниченное аддитивное возмущение [19].

Следующее уравнение характеризует циркулирующий ток

$$i_{ck+1} = \left(1 - \frac{TR}{L}\right) i_{ck} + \frac{T}{L} u_{ck}, \quad (7)$$

где

$$i_c = \frac{i_u + i_l}{2}, \quad (8)$$

$$u_c = \frac{u_{dc} - u_u - u_l}{2}, \quad (9)$$

напряжение шины постоянного тока u_{dc} предполагается постоянным.

Допущено, что динамика задания выходного тока преобразователя характеризуется следующей функцией, свободной от случайных возмущений:

$$\tilde{i}_{sk+1} = \left(1 - T \frac{R + 2R_g}{L + L_g}\right) \tilde{i}_{sk} + \frac{2T}{L + 2L_g} \tilde{u}_{sk}. \quad (10)$$

Для того, чтобы ток i_s точно следовал заданию $\tilde{i}_{sk}$, предлагается использовать следующий линейный регулятор:

$$u_{sk} = \tilde{u}_{sk} + u_{gk} + K_p^s (\tilde{i}_{sk} - i_{sk} - \eta_s), \quad (11)$$

где η_s – некоторый ограниченный шум измерения.

Подставив уравнение (11) в уравнение (4) и вычтя результат из уравнения (10), получим следующую динамику ошибки регулирования:

$$\tilde{i}_{sk+1} - i_{sk+1} = \left(1 - T \frac{R + 2R_g + 2K_p^s}{L + 2L_g}\right) (\tilde{i}_{sk} - i_{sk}) + \frac{2T}{L + 2L_g} (u_{nmk} + K_p^s \eta_s). \quad (12)$$

На основании уравнения (12) усиление K_p^s может быть выбрано с помощью метода определения полюсов. Для ограниченного аддитивного возмущения с нулевым средним значением u_{nm} и шума измерения η_s сигнал управления (11) способен поддерживать ток i_s в пределах некоторой окрестности $\tilde{i}_c$. Подробности о рассматриваемом способе управления можно найти в статье [20].

Для получения данного задания по циркулирующему току $\tilde{i}_c$ следует поддерживать напряжение звена постоянного тока u_c

$$u_{ck} = K_p^c (i_{ck} + \eta_c) + K_i^c x_k^c, \quad (13)$$

где η_c – шум измерения; x_c – представляет состояние контроллера, которое характеризуется динамическим уравнением

$$x_{k+1}^c = x_k^c + T(\tilde{i}_{ck}^* - i_{ck} - \eta_c). \quad (14)$$

Подставляя уравнение (13) в уравнение (7), с учетом уравнения (14) получаем следующий замкнутый контур:

$$\begin{bmatrix} i_{ck+1} \\ x_{k+1}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - T \frac{R - K_p^c}{L} & \frac{TK_i^c}{L} \\ -h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ck} \\ x_k^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ h \end{bmatrix} \tilde{i}_{ck}^* + \begin{bmatrix} \frac{TK_i^c}{L} \\ -h \end{bmatrix} \eta_c. \quad (15)$$

Предполагая, что преобразователь полностью управляем в соответствии с уравнением (15), параметры регулятора K_p^c и K_i^c могут быть определены с использованием метода размещения полюсов и поэтому матрица состояний уравнения (15) асимптотически устойчива.

Для каждого периода выборки управляющие сигналы (11) и (13) переводятся в индексы вставки n_{uk} и n_{lk} согласно следующим математическим выражениям:

$$\begin{cases} n_{uk} = \frac{N}{u_u^\Sigma} \left(\frac{u_{dc}}{2} - u_{sk} - u_{ck} \right); \\ n_{lk} = \frac{N}{u_l^\Sigma} \left(\frac{u_{dc}}{2} - u_{sk} - u_{ck} \right). \end{cases} \quad (16)$$

Основной регулятор системы управляет напряжением во всех узлах линии постоянного тока. Из ряда известных способов управления [2, 5, 25] был выбран способ регулирования наклона внешней характеристики сети, позволяющий поддерживать уровень напряжения в системе в случае его отклонения от задания.

У выбранного способа есть ряд преимуществ. Такой подход к управлению напряжением не требует организации связи между отдельными преобразователями в узлах системы. Также при этом нет необходимости организовывать отдельный регулятор напряжения в каждом узле сети. Этот метод регулирования хорошо изучен. В литературе его можно встретить под названиями управление мнимым импедансом (virtual impedance control) [29] и адаптивное смещение рабочей точки (adaptive voltage position) [1].

Метод основан на том, что внешняя характеристика сети описывается уравнением

$$u_{DC,j} = u_{DC,j}^* + \frac{1}{k_j} (i_{DC,j}^* - i_{DC,j}) \quad \forall j \in D, \quad (17)$$

где $i_{DC,j}$ – измеренный ток линии в узле j ; $u_{DC,j}$ – выходной сигнал регулятора основного уровня (который будет служить опорным напряжением для местного регулятора u_{Cref}); $i_{DC,j}^*$ и $u_{DC,j}^*$ – соответственно, задания для тока и напряжения, обеспечиваемого регулятором следующего уровня; k_j – коэффициент, определяющий наклон характеристики сети; D – число узлов, напряжение в которых управляется регулятором.

Способ осуществляется следующим образом. Система управляет напряжением в выбранных узлах системы в соответствии с заданным наклоном внешней характеристики и в зависимости от величины тока (уравнение (17)). Таким образом, уровень напряжения сети поддерживается в требуемых пределах в течение некоторого периода времени (шаг времени основного регулятора). При этом регулятор в ходе вычислений может изменить заданные уровни напряжения узлов системы в начале следующего шага. Слишком частая смена задания может привести к нестабильности всей системы вследствие возникновения колебаний между регуляторами различных иерархических уровней, поэтому динамика основного регулятора всей системы должна быть ниже динамики регуляторов во внешних контурах преобразователей, установленных в отдельных узлах системы. При моделировании описанный способ применялся для регулирования напряжения в первом узле системы (рис.3). Регулятор пересчитывал задание с интервалом в 1 с.

Регулятор вторичного уровня. Задача вторичного регулятора – управлять работой всей сети. Таким образом он периодически обновляет данные о токе и напряжении, поступающие с каждого узла. Пользуясь этими данными, вторичный контроллер решает проблему регулирования подачи электроэнергии и отправляет точные задания на каждый из узлов системы. Научную новизну представляет решение проблемы формирования требуемого потока мощности, которая описывается нелинейной системой уравнений второго порядка. Поиск решения осуществляется с

Рис.3. Схема лабораторной установки

помощью нового метода, теоретическое развитие которого подробно объяснено в статье [15]. Метод основан на принципе сжимающих отображений, утверждающем, что в сжимающем отображении некоего математического пространства имеется ровно одна неподвижная точка. Предлагаемое решение проверяется экспериментально.

Этот новый способ решения дает ряд важных преимуществ. Например, если выполняются некоторые незначительные ограничения, алгоритм всегда сходится к единственному решению. Кроме того, он требует меньше вычислений, чем другие, потому что не требует использования обратной Якобиан матрицы. Для заданной ошибки определения можно априори определить требуемое число итераций. Наконец, этот новый алгоритм позволяет обрабатывать данные с нескольких подчиненных узлов, отвечающих за поддержание напряжения сети. Это преимущество позволяет реализовать систему статического регулирования напряжения, когда за поддержание уровня напряжения отвечают несколько узлов.

В системе можно выделить три различных типа узлов: узлы, в которых известна проводимость нагрузки (УН) узлы, задание для режима в которых выдается по мощности (УМ) вторичным регулятором, и узлы задание для режима в которых выдается по напряжению (УП) первичным регулятором. Таким образом, если линия постоянного тока имеет n узлов, учитывая, что имеется m, j и $n-m-j$ узлов УН, УМ и УП соответственно, то на вход алгоритма подается множество проводимостей $g_1, \dots, g_m$ для множества УН, множество мощностей $P_{m+1}, \dots, P_{m+k}$ для множества УМ и множество частот $\omega_{m+k+1}, \dots, \omega_n$ для множества узлов УП. Соответственно, когда известны параметры линии, мы можем составить матрицу проводимости сети (где известные нагрузки представлены в виде соответствующих элементов основной диагонали):

$$G = \begin{bmatrix} G_{m+k} & -\Gamma_{m+k} \\ -\Gamma_{m+k}^T & \Lambda_{n-m-k} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где

$$G_{m+k} = \begin{bmatrix} g_{1,1} & \dots & -g_{1,m} & -g_{1,m+1} & \dots & -g_{1,m+k} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -g_{m,1} & \dots & g_{m,m} & -g_{m+1,m} & \dots & -g_{m,m+k} \\ -g_{m+1,1} & \dots & -g_{m,m+1} & g_{m+1,m+1} & \dots & -g_{m+1,m+k} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -g_{m+k,1} & \dots & -g_{m,m+k} & -g_{m+1,m+k} & \dots & g_{m+k,m+k} \end{bmatrix};$$

$$\Gamma_{m+k} = \begin{bmatrix} g_{1,m+k+1} & \cdots & -g_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -g_{m+k+1,1} & \cdots & g_{n,n} \end{bmatrix};$$
$$\Lambda_{n-m-k} = \begin{bmatrix} g_{m+k+1,m+k+1} & \cdots & -g_{m+k+1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -g_{n,m+k+1} & \cdots & g_{n,n} \end{bmatrix}.$$

Следовательно, поток мощности в линии определяется из следующей системы нелинейных уравнений:

$$G_{m+k}U = \Psi(U) + \Gamma_{m+k}W, \quad (19)$$

где $U = [u_1, \dots, u_{m+k}]$ и $W = [\omega_{m+k+1}, \dots, \omega_n]$ представляют соответственно неизвестное и известное напряжения, а матрица $\Psi(U)$ определяется как

$$\Psi(U) = \left[0, \dots, 0, \frac{P_{m+1}}{u_{m+1}}, \dots, \frac{P_n}{u_n} \right]. \quad (20)$$

Таким образом, с учетом нескольких ограничений [15], для заданного номинального напряжения линии вектор U рассчитывается с помощью алгоритма, основанного на принципе сжимающих отображений, при этом в неподвижной точке все напряжения близки к номинальному значению. Кроме того, для исключения невыполнимых решений в представленных формулах учитываются ограничения, накладываемые всеми преобразователями.

Масштабированная линия электропередачи постоянного тока состоит из трех преобразователей переменного/постоянного тока. Номинальное напряжение линии электропередачи постоянного тока составляет 150 В, а номинальная мощность 4 кВт. В узлах 1 и 2 установлены трехуровневые ИИН, а в узле 3 размещается ММП с пятью модулями на плечо. Переменные напряжения во всех трех присоединениях одинаковы (действующее значение 127 В), для согласования напряжения питающей сети с напряжением линии постоянного тока в состав преобразователей входят понижающие трансформаторы. Также последовательно с преобразователями для сглаживания пульсаций токов включены реакторы. Это позволяет достичь синусоидальных токов. На стороне постоянного тока в местах присоединения преобразователей присоединены катушки индуктивности и активные сопротивления, имитирующие импеданс реальных линий электропередачи. Кроме того, к узлам 1 и 2 с целью снижения пульсаций постоянного напряжения подключены LC-фильтры. С точки зрения вторичного регулятора узел 1 является узлом УП, а узлы 2 и 3 являются узлами УМ.

Далее опишем компоненты испытательного стенда.

- *Инверторы – источники напряжения.* Коммерческие трехуровневые преобразователи, источники напряжения установлены в узлах 1 и 2. В качестве силовых вентилях применяют доступные на рынке биполярные транзисторы с изолированным затвором марки SEMISTACK-IGBT. Максимальное напряжение коллектор-эмиттер – 750 В и максимальный прямой ток 30 А (среднеквадратичное значение). Трехуровневые ИИС контролируются в режиме реального времени с помощью модуля DS1104 R&D. Эта плата обрабатывает аналоговые сигналы от датчиков для управления устройством с помощью ПК через интерфейсы MATLAB-SIMULINK и ControlDesk.

- *Модульный многоуровневый преобразователь.* Как упоминалось ранее, масштабированный ММП включает пять подмодулей. Каждый подмодуль представляет из себя полумост, плечи которого образованы биполярными транзисторами с изолированным затвором. В каждом подмодуле также есть конденсатор, являющийся ключевым элементом в преобразователе. Благодаря кон-

денсатору удастся получать желаемые переменные токи. ММП управляется посредством аппаратной платформы OPAL-RT, которая может обрабатывать все необходимые ММП сигналы.

- *Понижающие трансформаторы.* Включены в систему с целью снижения напряжения переменного тока для обеспечения нормальной работы преобразователей. Обмотки трансформатора соединены по схеме треугольник – треугольник и обеспечивают в каждом узле гальваническую развязку.

- *Реакторы, установленные в фазах переменного тока.* Для сглаживания переменных токов (уменьшения гармонических составляющих) в узлы 1 и 2 (узлы ИИС) установлены реакторы, обладающие большой индуктивностью. Важно отметить, что при использовании ММП не нужно подключать фильтры в месте присоединения преобразователя к сети переменного тока.

- *LC-фильтры.* На стороне постоянного тока и для ограничения максимальной пульсации напряжения и тока на уровне 5 % в узлы 1 и 2 включены LC-фильтры. Это позволяет обеспечить постоянство напряжения в линии постоянного тока.

- *Имитация линии постоянного тока.* Для имитации реальной линии передачи постоянного тока в масштабированной модели присутствуют катушки индуктивности и активные сопротивления. Их значения могут быть изменены механически. Таким образом, можно моделировать несколько линий электропередачи постоянного тока с различными параметрами.

- *Сглаживающие фильтры.* Для улучшения управляющих сигналов в аппаратные средства установлены сглаживающие аналоговые фильтры первого порядка.

- *Регулятор вторичного уровня.* Реализован с помощью наблюдателя на основе персонального компьютера, который рассчитывает требуемый поток мощности. В течение каждого периода выборки, равного 30 с, данные со всех узлов поступают на персональный компьютер по проводу Ethernet. После расчетов энергопотребления наблюдатель отправляет новые референтные значения каждому из узлов линии электропередачи по сети Ethernet.

Результаты экспериментов. Экспериментальные результаты получены на масштабированной магистральной линии постоянного тока. Надежность многоуровневой системы управления, включающей в себя несколько уровней управления различных масштабов времени, проверяется в условиях внешних возмущений. Возмущения создаются в узле 2 на стороне переменного тока посредством снижения потребляемой мощности до нуля. В табл.2 приведены параметры регуляторов на каждом из уровней управления.

Таблица 2

Параметры регуляторов

Условное обозначение	Параметр	Величина
Преобразователь типа ИИН. Узел 1		
h_{VSC}	Период опроса датчиков	0,1 мс
f_{PWM}	Частота пилообразного сигнала ШИМ	10 кГц
K_{pq}	Коэффициент усиления пропорциональной составляющей ПИ-регулятора q -составляющей тока	0,03
T_{iq}	Постоянная времени ПИ-регулятора q -составляющей тока	0,002 с
K_{pd}	Коэффициент усиления пропорциональной составляющей ПИ-регулятора d -составляющей тока	0,03
T_{id}	Постоянная времени ПИ-регулятора d -составляющей тока	0,002 с
K_{uc}	Пропорциональный коэффициент усиления ПИ-регулятора напряжения	0,14
T_{uc}	Постоянная времени ПИ-регулятора напряжения	0,0005 с
Основной регулятор		
h_{pri}	Период дискретизации	1 с
k	Наклон характеристики	0,1 А/В
Преобразователь типа ИИН. Узел 2		
Регулятор местного уровня		
h_{VSC}	Период опроса датчиков	0,1 мс
f_{PWM}	Частота пилообразного сигнала ШИМ	10 кГц
K_{pq}	Коэффициент усиления пропорциональной составляющей ПИ-регулятора q -составляющей тока	0,03
T_{iq}	Постоянная времени ПИ-регулятора q -составляющей тока	0,002 с
K_{pd}	Коэффициент усиления пропорциональной составляющей ПИ-регулятора d -составляющей тока	0,03
T_{id}	Постоянная времени ПИ-регулятора d -составляющей тока	0,002 с

Условное обозначение	Параметр	Величина
ММП. Узел 3		
<i>Регулятор местного уровня</i>		
T	Период опроса датчиков	50 мкс
K_p^s	Коэффициент усиления пропорциональной составляющей выходного тока	11,8
K_p^c	Коэффициент усиления пропорциональной составляющей циркулирующего тока	14,3
K_i^c	Коэффициент усиления интегральной составляющей циркулирующего тока	6400
<i>Регулятор вторичного уровня</i>		
h_{sec}	Период опроса датчиков	30 с

На рис.4 показаны мощности в узлах, где установлены преобразователи. Знак мощности определяется следующим образом: положительный для потребляемой стороны постоянного тока мощности и отрицательный в обратном случае. Эксперимент начинается с состояния равновесия в момент времени $t = 0$ с (для измерения времени используются внешние часы), в момент времени примерно $t = 5,55$ с появляется возмущение в узле 2, в котором энергия потреблялась со стороны постоянного тока (0,5 кВт), и требуемая в этом узле мощность уменьшается до нуля. При этом в линии постоянного тока появляется дисбаланс потребляемой и отдаваемой мощности, следовательно, первичный регулятор в узле 1 обнаруживает, что мощность системы уменьшилась, и согласно закону статического регулирования регулятор выдает задание на повышение уровня напряжения в этом узле. Напряжение сети растет, пока не будет достигнута новая точка равновесия (рис.4, а). Интересно отметить, что благодаря местному регулятору ММП (узел 3) потребляемая мощность в этом узле остается постоянной, как показано на рис.4.

В момент времени $t = 15$ с с учетом состояния системы в каждом узле основной регулятор выдает новое задание. Это задание рассчитано при нулевом потреблении электроэнергии в узле 2, который все еще не работает в нормальном режиме. Соответственно, узлы 1 и 3 получают опорные значения, рассчитанные измерением уровня потребления мощности, гарантирующего стабильность работы всей системы.

В момент времени $t = 31,7$ с узел 2 возобновляет нормальную работу и снова начинает потреблять 0,5 кВт. Это также является возмущением для линии электропередачи, система статического регулирования в узле 1 снова отрабатывает возмущение, уменьшает напряжение в линии, потому что по линии теперь передается большая мощность. В очередной раз основной регулятор приводит систему в устойчивое состояние. Однако выбранная рабочая точка может быть неоптимальной или нецелесообразной для всей системы. По этой причине с систему введен вторичный регулятор, который решает эту проблему и выдает дальнейшее задание по напряжениям и токам в системе.

Наконец, в момент времени $t = 45$ с для всех узлов в системе вторичным регулятором выдается новое задание и системой достигается новая точка устойчивого равновесия.

На рис.4, б мощности представлены в увеличенном масштабе. Можно отметить, что динамика изменения мощностей быстрее в узлах, где регулируется ток (узлы 2 и 3). Реактивная мощность во всех узлах поддерживается равной нулю на уровне задания.

Рис.4. Мощность преобразователей в общем виде (а), масштабированная (б)

Рис.5. Напряжение в узле 1

Рис.6. Напряжение конденсаторов ММП

Рис.7. Напряжение (а) и ток (б) фазы А

На рис.5 показано напряжение в узле 1. Для демонстрации динамики основного контроллера отдельно продемонстрированы масштабированные изображения диаграммы в важные моменты эксперимента. Уровень напряжения всегда близок к номинальному значению, но он изменяется в соответствии с законом статического регулирования. Однако напряжение в этом узле всегда стабилизируется, а значит, стабилизируется и напряжение всей линии постоянного тока.

На рис.6 показано напряжение в конденсаторах ММП в одной из ветвей преобразователя. Можно наблюдать, что на конденсаторах всегда поддерживается один и тот же уровень напряжения, даже если заданные ММП значения мощности изменяются или изменяется уровень постоянного напряжения в сети. Это показывает надежность регуляторов ММП в частности и надежность всего предлагаемого метода управления в целом.

На рис.7, а показано выходное напряжение фазы А, генерируемое ММП. Мы можем наблюдать пять различных уровней напряжения, что соответствует наличию в плече пяти подмодулей. Напряжения в фазах А, В и С формируют переменные токи в узле, к которому подключен ММП.

На рис.7, б показан выходной ток фазы А в узле ММП. Хотя он имеет почти синусоидальную форму, уровень гармонических искажений остается значительным. Этот параметр будет улучшен в промышленных установках, так как рассматриваемый ММП представляет собой лабораторный прототип, он работает с несколькими подмодулями, в то время как в плечах промышленных установок предполагается использование сотен модулей.

В табл.3 приведено сравнение предложенного метода и классического алгоритма Ньютона – Рафсона для решения системы дифференциальных уравнений и определения потока мощности.

Для каждого рассмотренного периода опроса датчиков вторичным регулятором время работы предлагаемого алгоритма с той же относительной ошибкой ($\varepsilon = 0,001$) примерно в пять раз ниже. Для итераций можно отметить идентичность рассматриваемых способов.

Таблица 3

Сравнение методов формирования потоков мощности

Период опроса, с	Фиксированная точка		Ньютон – Рафсон	
	Относительная погрешность ($\varepsilon = 0,001$)		Относительная погрешность ($\varepsilon = 0,001$)	
	Число итераций	Время на вычисления, с	Число итераций	Время на вычисления, с
15	3	0,021	3	0,098
45	3	0,023	4	0,107

Заключение. В статье предлагается полная схема управления магистральными (с рядом ответвлений) линиями постоянного тока с использованием модульных многоуровневых преобразователей (ММП) для преобразования переменного тока в постоянный. Предлагаемый способ включает различные уровни управления: вторичный, первичный и локальный в иерархическом порядке. Натурные эксперименты в трехфазной линии постоянного тока (номинальное напряжение 150 В) подтвердили надежность структуры подчиненного регулирования как в нормальных условиях, так и в условиях дисбаланса.

Предложен новый метод формирования потока мощности. Он обеспечивает несколько преимуществ, которые были подтверждены экспериментально, например, требует меньше вычислений и гарантирует сходимость при некоторых ограничениях.

Основной регулятор осуществляет статическое регулирование напряжения всей сети. Натурный эксперимент показал, что постоянное напряжение остается стабилизированным, даже в условиях внешнего воздействия.

Для преобразователей, работающих в режиме источника напряжения (ИИН), представлен способ настройки ПИ-регуляторов, а для ММП представлен новый метод оптимизации контура управления выходным переменным током и регулятора циркулирующего тока на основе разработанной математической модели. Цели регулирования достигаются в обоих случаях. Например, в случае ММП тест показал, что обмен энергией в конденсаторах со стороны переменного тока происходит в соответствии с заданием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Adaptive voltage position design for voltage regulators / K.Yao, Y.Ren, J.Sun, K.Lee, M.Xu, J.Zhou, F.C.Lee // Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC'04. IEEE, 2004. Vol. 1. P. 272-278. DOI: 10.1109/APEC.2004.1295821
2. An Enhanced DC Voltage Droop-Control for the VSC--HVDC Grid / H.Li, C.Liu, G.Li, R.Iravani // IEEE Trans. Power Syst. 2017. Vol.32(2). P. 1520-1527. DOI: 10.1109/TPWRS.2016.2576901
3. An HVDC experimental platform with MMC and two-level VSC in the back-to-back configuration / N.Stankovic, M.Jiménez Carrizosa, A.Arzand, P.Egrot, J.C.Vannier // 2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). IEEE. 2016. P. 436-441. DOI: 10.1109/ISIE.2016.7744929
4. Arrillaga J. Flexible Power Transmission. The HVDC Options / J.Arrillaga, Y.H.Liu, N.R.Watson. 1st ed. Chichester: John Wiley, 2007. 362 p.
5. Benchaib A. Advanced control of AC/DC power networks. System of systems approach based on spatio-temporal scales. Wiley, 2015. 164 p. DOI: 10.1002/9781119135760
6. Carrizosa M.J. Hierarchical control scheme for multi-terminal high voltage direct current power networks. 2015. URL: tel.archives-ouvertes.fr/tel-01179391 (дата обращения 22.07.2015)
7. Control of Modular Multilevel Converters Under Singular Unbalanced Voltage Conditions With Equal Positive and Negative Sequence Components / E.Prieto-Araujo, A.Junyent-Ferfe, G.Clariana-Colet, O.GomisBellmunt // IEEE Transactions on Power Systems. 2017. Vol. 32(3). P.2131–2141. DOI: 10.1109/TPWRS.2016.2598617
8. A Control Strategy for Multiterminal DC Grids With Renewable Production and Storage Devices/ M.J.Carrizosa, A.Arzand, F.D.Navas, G.Damm, J.C.Vannier // IEEE Trans. Sustain. Energy. 2018. Vol. 9(2). P. 930-939. DOI: 10.1109/TSTE.2017.2766290
9. Control of VSC-HVDC for Wind Farm Integration with Real-Time Frequency Mirroring and Self-Synchronizing Capability / R.Yang, C.Zhang, X.Cai, G.Shi, J.Lyu // 2018 International Power Electronics Conference. IEEE. 2018. P. 4220-4226. DOI: 10.23919/IPEC.2018.8507477

10. Fast Diagnostic Method of Open Circuit Fault for Modular Multilevel DC/DC Converter Applied in Energy Storage System / K.Bi, Q.An, J.Duan, L.Sun, K.Gai // IEEE Trans. Power Electron. 2017. Vol. 32(5). P. 3292-3296. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2646402
11. *Gnanarathna U.N.* Efficient Modeling of Modular Multilevel HVDC Converters (MMC) on Electromagnetic Transient Simulation Programs / U.N.Gnanarathna, A.M.Gole, R.P.Jayasinghe // IEEE Trans. Power Deliv. 2011. Vol. 26(1). P. 316-324. DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2060737
12. Hydro-Qubec Rapport Annuel 2012 // Hydro-Qubec. URL: www.metallos.org/site/assets/files/2622/rapport-annuel-2012_hydro-quebec.pdf (дата обращения 14.03.2020).
13. HVDC in china // Doubletree Systems, Inc. URL: www.dsus.com/cet/HVDCinChina_EPRI2013_HVDC.pdf (дата обращения 14.03.2020)
14. Inelfe, the France-Spain HVDC plus interconnection is being realized as part of the european HVDC power freeways // Siemens. URL: www.ptd.siemens.de/newsletter2012_07.htm (дата обращения 14.03.2020).
15. A new generalized power flow method for multi connected DC grids / E.Jimenez, M.J.Carrizosa, A.Benchai, G.Damm, F.Lamnahbi-Lagarigue // Int. J. Electr. Power Energy Syst. Elsevier, 2016. Vol. 74. P. 329-337. DOI:10.1016/J.IJEPES.2015.07.032
16. *Jovcic D.* High voltage direct current transmission : converters, systems and DC grids / D.Jovcic, K.Ahmed. John Wiley, 2007. 456 p.
17. Lesnicar A., Marquardt R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range // 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. IEEE. 2003. Vol. 3. P. 272-277. DOI: 10.1109/PTC.2003.1304403
18. *Li R.* DC Fault Detection and Location in Meshed Multiterminal HVDC Systems Based on DC Reactor Voltage Change Rate / R.Li, L.Xu, L.Yao // IEEE Trans. Power Deliv. 2017. Vol.32(3). P. 1516-1526. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2590501
19. MMC circulating current reference calculation in ABC frame by means of Lagrange Multipliers for ensuring constant DC power under unbalanced grid conditions / G.Bergna, J.-A.Suul, E.Berne, J.-C.Vannier, M.Molinas // 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE. 2014. P. 1-10. DOI: 10.1109/EPE.2014.6910909
20. *Mayne D.Q.* Robust model predictive control of constrained linear systems with bounded disturbances / D.Q.Mayne, M.M.Seron, S.V.Raković // Automatica. Pergamon. 2005. Vol. 41(2). P. 219-224. DOI: 10.1016/J.AUTOMATICA.2004.08.019
21. Nonlinear control design for a multi-terminal VSC-HVDC system/ Y.Chen, J.Dai, G.Damm, F.Lamnahbi-Lagarigue // 2013 European Control Conference. IEEE. 2013. P. 3536-3541. DOI: 10.23919/ECC.2013.6669665
22. *Ottersten R.* On control of back-to-back converters and sensorless induction machine drives // Chalmers University of Technology. Göteborg, 2003. 153 p.
23. *Park R.H.* Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part I // Trans. Am. Inst. Electr. Eng. 1929. Vol. 48(3). P. 716-727. DOI: 10.1109/T-AIEE.1929.5055275
24. *Sanjuan S.L.* Voltage Oriented Control of Three-Phase Boost PWM Converters // Chalmers University of Technology. Göteborg, 2010. 105 p.
25. *Shah S.* HVDC transmission system architectures and control – A review / S.Shah, R.Hassan, J.Sun // 2013 IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics. IEEE. 2013. P. 1-8. DOI: 10.1109/COMPEL.2013.6626396
26. Sardinia – Corsica – Italy Interconnection // Terna. URL: www.terna.it/en/projects/projects-common-interest/sardinia-corsica-italy-interconnection (дата обращения 14.03.2020).
27. The Gotland HVDC link // ABB group. URL: new.abb.com/systems/hvdc/references/the-gotland-hvdc-link (дата обращения 14.03.2020).
28. Virtual Capacitor Control: Mitigation of DC Voltage Fluctuations in MMC-Based HVdc Systems / K.Shinoda, A.Benchai, J.Dai, X.Guillaud // IEEE Trans. Power Deliv. 2018. Vol. 33(1). P. 455-465. DOI: 10.1109/TPWRD.2017.2723939
29. Virtual-Impedance-Based Control for Voltage-Source and Current-Source Converters / X.Wang, Y.W.Li, F.Blaabjerg, P.C.Loh // IEEE Trans. Power Electron. 2015. Vol. 30(12). P. 7019-7037. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2382565

Авторы: **М.Хименез Карризоса**, д-р наук, ассистент, Miguel.jimenezcarrizosa@upm.es (Центр Энергетики, Мадридский политехнический университет, Мадрид, Испания), **Н.Станкович**, д-р наук, инженер, nikola.stankovic@edf.fr (Électricité de France (Electricité de France), Париж, Франция), **Ж.-К.Ванье**, д-р наук, профессор, jean-claude.vannier@centralesupelec.fr (Энергетический факультет Высшей школы электрики, Париж, Франция), **Я.Э.Шклярский**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, Shklyarskiy_YaE@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **А.И.Барданов**, канд. техн. наук, ассистент, Bardanov_AI@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 28.01.2020.

Статья принята к публикации 03.04.2020.