

Моделирование и испытательные схемы выключателей постоянного тока для многоподстанционных сетей постоянного тока

ШУЛЬГА Р.Н.

Рассмотрены проблемы создания гибридных выключателей постоянного тока применительно к задаче реализации кабельных многоподстанционных сетей постоянного тока высокого и среднего напряжения. Исследованы модели гибридных выключателей, которые позволяют отработать их конструкцию. Сопоставлены испытательные схемы выключателей различных производителей следующих типов: с накопительным конденсатором, с емкостью, разряжаемой через реактор, и с источником высокой и низкой частоты. Показаны преимущества использования последнего типа схемы и необходимость стандартизации испытательных схем для сопоставления характеристик гибридных выключателей постоянного тока.

К л ю ч е в ы е с л о в а: гибридный выключатель, многоподстанционная сеть, постоянный ток, испытательная схема, модель выключателя, схема испытаний, стандартизация

В 70–80 гг. прошлого века в ВЭИ и НИИПТ (Россия) были проведены исследования по созданию многоподстанционной передачи постоянного тока (МППТ) Сибирь–Центр напряжением 1500 кВ, мощностью 6 ГВт, длиной 3600 км с четырьмя промежуточными подстанциями, которая должна была стать остовом ЕЭС. Отсутствие выключателей постоянного тока (далее DC-выключатели) привело к необходимости при отключении подстанций или участков ВЛ использовать автоматику перевода в инверторный режим (ПИР) для коммутации их в бестоковую паузу с помощью быстродействующих выключателей переменного тока (далее AC-выключатели). Сброс нагрузки на стороне переменного тока негативно влияет на условия работы потребителей, а в ряде случаев недопустим. Для исследованной радиальной МППТ выделяемая энергия в выключателях должна составлять от 30 до 50 МДж, что делает выключатель сложным, дорогим и ненадежным.

Происходившие в начале 2000-х годов в большинстве стран системные аварии, носящие техногенный или природный характер, а также локальные войны потребовали создания неуязвимых сетей энергоснабжения, построенных на основе кабельных линий (КЛ), преобразователей напряжения (ПН) и DC-выключателей. Этому вопросу и были посвящены две последние сессии СИГРЭ с целью создания многоподстанционных сетей постоянного тока (МСПТ) со смешанной или кольцевой топологией.

Отражением этих стремлений явилась принятая в США национальная программа создания кольцевой сверхпроводящей МСПТ по периметру страны к 2030 г. [1]. В Европе проводятся исследования по

созданию к 2050 г. кабельной МСПТ напряжением 200 кВ с длиной участков КЛ 200–300 км и перетоком мощностей на уровне 500–1000 МВт [2]. Аналогичные МСПТ прорабатываются в Китае и Индии. Россия, являясь инициатором создания подобных систем, должна создавать кабельные МСПТ среднего напряжения 10–35 кВ и меньшей длины в десятки километров для гарантированного энергоснабжения городов, спецобъектов и автономных регионов. Ключевым элементом для создания МСПТ являются DC-выключатели.

Рассмотренные в [2] три типа DC-выключателей: резонансные (в отечественной практике конденсаторные), полупроводниковые и гибридные, имеют свои области применения, достоинства и недостатки. Наиболее простые и надежные разработаны в ВЭИ на напряжения 6, 10, 35 кВ на базе вакуумных дугогасительных камер и индукционно-динамических приводов, которые обеспечивают приемлемое быстродействие отключения на уровне 5 мс [3]. Увеличение быстродействия ниже 5 мс должно ограничить воздействие сверхтока до приемлемого уровня, к чему особенно чувствительны полупроводниковые вентили и кабели. Разработанные за рубежом полупроводниковые DC-выключатели позволяют отключать ток за время 2–3 мс, но уровни перенапряжения и энергии при этом весьма значительны, а сопротивление выключателей в проводящем состоянии составляет единицы мОм вместо допустимых единиц мкОм, да и стоимость и габариты слишком велики.

Более перспективны гибридные выключатели, которые обеспечивают приемлемое быстродействие на уровне 5 мс и низкие потери в проводящем состоянии. Хотя эти выключатели также дороги и

имеют значительные габариты, их разработка проводится во всех ведущих странах мира и они наиболее востребованы для создания МСПТ. При этом характеристики DC-выключателей зависят от характера испытательных схем, которые у разных производителей различаются. В статье анализируются схемы моделирования и выполнения испытательных установок гибридных DC-выключателей применительно к кабельным МСПТ.

Моделирование DC-выключателей. Наиболее продвинутый прототип в части разработки и моделирования гибридных DC-выключателей предложен фирмой ABB [4]. Ставится задача разработки DC-выключателя для европейской кабельной МСПТ напряжением 200 кВ, а впоследствии 320 кВ с номинальным током 2 кА и током отключения 10 кА, быстрым отключением до 5 мс и выдерживаемым напряжением 1,5 отн. ед. Расчетная схема замещения DC-выключателя приведена на рис. 1,а, где 1 – напряжение выключателя; 2 – ОПН, ограничивающий уровень перенапряжений; U_{DC} – источник рабочего напряжения; L_{DC} – индуктивность ~ 100 мкГн, включая реактор и кабель, в котором КЗ возникает на удалении 200 км.

На рис. 1,б: 1 – напряжение выключателя; 2 – ток ОПН; 3 – ток выключателя; 4 – время отключения; 5 – ток отключения; 6 – момент возникновения КЗ; 7 – длительность отключения КЗ.

DC-выключатель работает следующим образом. После возникновения КЗ в момент времени 6 ток выключателя 3 начинает резко нарастать, но не достигая максимального значения, спустя несколько миллисекунд выключатель обрывает ток, который переходит в ОПН и медленно снижается, разряжая энергию, накопленную в индуктивности L_{DC} .

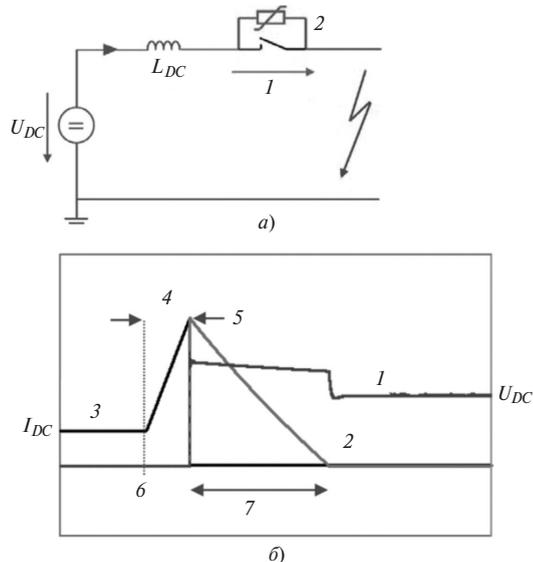


Рис. 1. Расчетная схема замещения DC-выключателя (а) и формы тока и напряжения во времени (б)

Прототип DC-выключателя содержит четыре ячейки, в каждой из которых содержится четыре блока с 20 последовательно включенными приборами IGBT напряжением 4,5 кВ, зашунтированных RCD снаббером. Конструкция ячейки прототипа DC-выключателя напряжением 80 кВ показана на рис. 2. Для управления используется оптический драйвер, система охлаждения не требуется, так как номинальный ток не протекает через показанный на рис. 2 выключатель, а проходит по вспомогательной ветви с быстродействующим разъединителем.

Реализованные в прототипе DC-выключателя параметры следующие: номинальный ток 2 кА; ток отключения 9 кА; время отключения 2 мс; скорость нарастания отключаемого тока 3,5 кА/мс при индуктивности 100 мкГн.

На рис. 3 по данным [5] приведена модель гибридного DC-выключателя с учетом системы управления, где 1 – сброс; 2 – самозащита; 3 – индикатор состояния; 4 – вспомогательная ветвь; 5 – главная ветвь; 6 – ОПН; 7 – уставка T_{mec} при изменении входа от команды верхнего уровня; 8 – команда верхнего уровня; 9 – сохранение при сбросе аварии; 10 – задержка T_{mec} ; 11 – задержка T_{res} ; 12 – сохранение T_{res} при изменении входа; 13 – универсальный логический блок с логикой: если $S=1$, то $Q=1$, если $C=1$, то $Q=0$. Вспомогательная ветвь 4 содержит быстродействующий разъединитель 5 и вспомогательный вентиль T_1 . Главная ветвь 5 содержит главный вентиль T_2 , замещающий четыре ячейки прототипа на рис. 2. Главная ветвь 5 зашунтирована ОПН 6. Модель DC-выключателя подключена к источнику тока i_{DC} через индуктивность L_{DC} и отделитель S_2 .

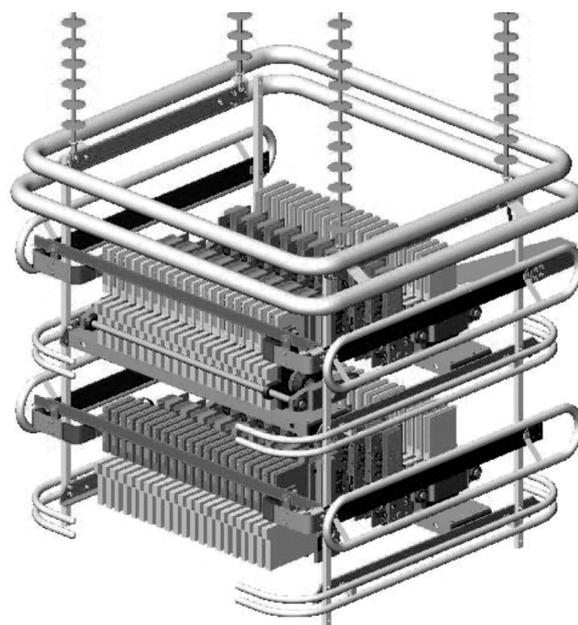


Рис. 2. Конструкция ячейки прототипа DC-выключателя фирмы ABB

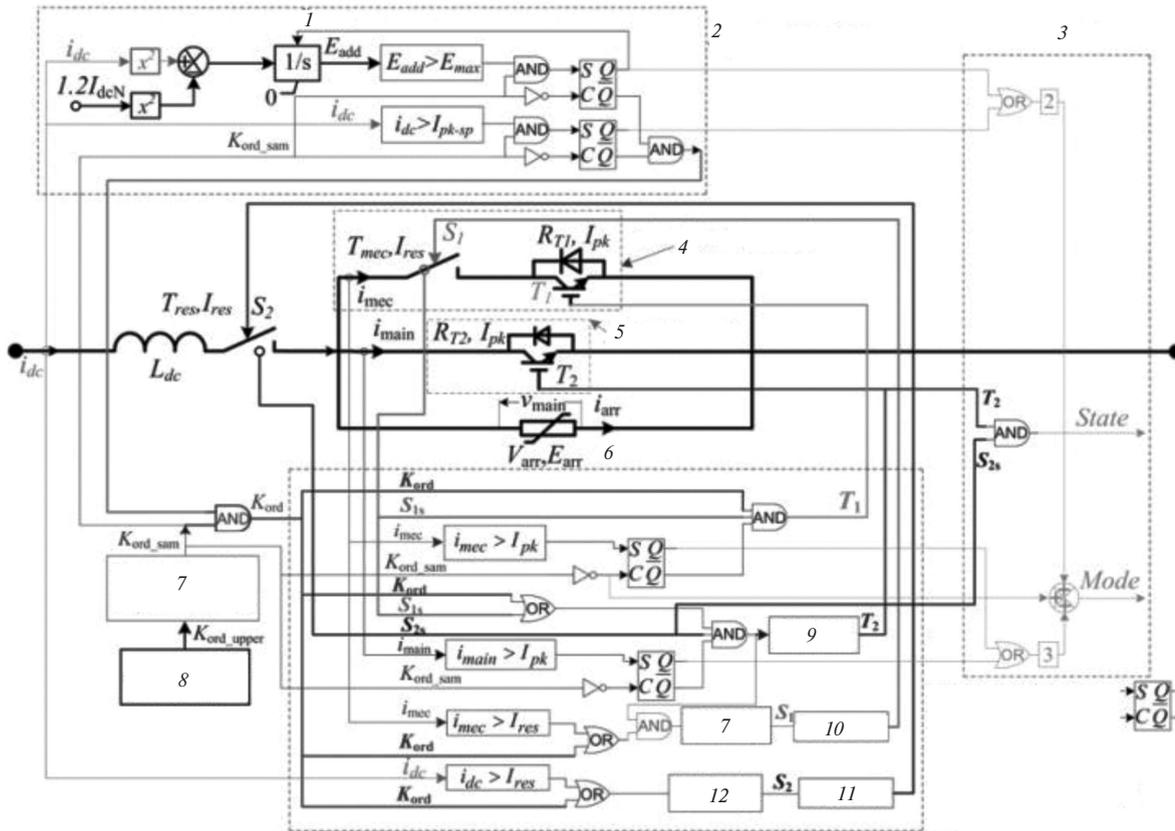


Рис. 3. Модель гибридного DC-выключателя

Целевое назначение модели рис. 3 состоит в задании временных моментов коммутации для открытия и закрытия DC-выключателя в составе полупроводникового вентиля и двух механических ключей в динамике при отключении тока КЗ. Механические ключи моделируются идеальными коммутаторами, которые отключают остаточный ток. Вспомогательный вентиль замещает матрицу 3+3 из девяти приборов IGBT, которая должна пропустить номинальный ток и создать падение напряжения 3–4 кВ для перевода тока КЗ в главную ветвь 5. Главный вентиль T_2 замещается единичным прибором IGBT с соответствующими расчетными параметрами.

Модель включает иерархическую защиту МСПТ, а также самозащиту выключателя, срабатывающую при превышении током допустимого уровня с учетом индивидуальной защиты драйверов каждого прибора IGBT, которая срабатывает, если напряжение коллектор-эмиттер оказывается выше определенного значения. Обведенная пунктиром верхняя часть схемы рис. 3 соответствует логике самозащиты. Средняя часть рис. 3 соответствует силовой схеме DC-выключателя. Обведенная пунктиром нижняя часть соответствует схеме управления и контролем состоянием DC-выключателя. Принцип работы

заключается в ограничении тока КЗ выключателя до допустимого уровня при контроле состояния ключей и вентилях по заданным значениям тока отключения I_{pk} в ветви 5 и энергии E_{arc} , выделяемой в ОПН (ветвь 6) при допустимом значении защитного уровня U_{arc} .

Принцип работы DC-выключателя с четырьмя ячейками в токоограничивающем состоянии отражен на схеме рис. 4, где I – защищаемая зона; II – зона аварии; I_{ff} – аварийный ток. Транзисторы $S_{c1}–S_{c4}$, зашунтированные диодами и ОПН в каждой ячейке, защищены четырьмя ОПН, которые ограничивают перенапряжения $E_{a1}–E_{a4}$ на каждой ячейке. На модели ЕМТР-RV были отработаны следующие режимы: нормальный установившийся режим, режим самозащиты, включение при номинальном токе, включение на ток КЗ и токоограничение. Модель нормально функционировала во

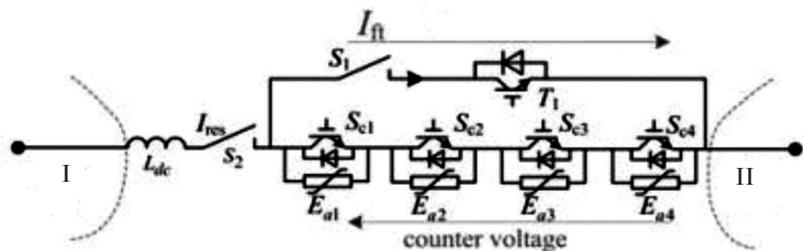


Рис. 4. Принцип работы гибридного DC-выключателя

всех режимах и показала хорошую сходимость с результатами испытаний прототипа. Следующей ступенью моделирования является отработка модели в режиме реального времени.

Испытательные схемы DC-выключателей. Большинство испытательных схем различных производителей содержат заряжаемую конденсаторную батарею КБ, которую разряжают через токоограничивающий реактор. На рис. 5 приведена испытательная схема DC-выключателя фирмы АВВ. На схеме рис. 5: 1 – наружное распределительное устройство ± 150 кВ DC, содержащее регулируемый трансформатор, два выпрямителя DC разной полярности; 2 – испытательная схема выключателя; 3 – двунаправленный DC-выключатель; 4 – испытуемый DC-выключатель.

По схеме рис. 5 были проведены полномасштабные испытания прототипа гибридного DC-выключателя напряжением 80 кВ фирмы АВВ. Для проекта европейской МСПТ были также выполнены испытания гибридного DC-выключателя напряжением 120 кВ, номинальным током 1,5 кА фирмы Alstom. Эти испытания предусматривали: воздействие высокого выдерживаемого напряжения в разомкнутом состоянии, воздействие тока КЗ в замкнутом состоянии, а также прерывание DC тока за короткий период. Испытательная схема фирмы Alstom гибридного DC-выключателя приведена на рис. 6 и содержит два LC-контура, один из которых низкой частоты (32 Гц) для пропускания номинального тока и высокой частоты (66 Гц) для имитации аварийного тока. На рис. 6: 1 – низкочастотный LC-контур; 2 – высокочастотный LC-контур; 3 – ключ для имитации действия защиты; 4 – разъединитель; 5 – медленный разъединитель-заземлитель; 6 – паразитная индуктивность 90 мкГн; 7 – паразитная индуктивность 60 мкГн; 8 – испытуе-

мый DC-выключатель. Способность выдерживать грозовой импульс 1,2/50 мкс в разомкнутом состоянии проверялась по методике МЭК 60060-1 воздействием 15 импульсов различной полярности. Разъединитель испытывался воздействием импульсов амплитудой 763 кВ при допустимом уровне 650 кВ. Токопроводящая способность проверялась по стандарту МЭК 622714-1, при этом DC-выключатель выдержал перегрузочный ток 3676 А в течение 2 мин. Окончательные испытания прототипа DC-выключателя показали прерывание аварийного тока 5285 А за время 5,3 мс.

Фирма Mitsubishi (Япония) разработала два отдельных метода испытаний гибридных DC-выключателей по рис. 7, где 1 – AC-источник; 2 – вспомогательный выключатель; 3 – испытуемый DC-выключатель; 4 – искровой промежуток; 5 – прерыватель тока КЗ; 6 – асимметричный ток КЗ; 7 – момент прерывания тока КЗ; 8 – время гашения дуги; 9 – момент обрыва тока; 10 – амплитуда тока отключения; 11 – момент замыкания ключа SW1; 12 – момент замыкания ключа SW2 и размыкания ключа SW1; 13 – ток разряда цепочки L_S-R_S . При испытании вторым способом от разряжаемой через реактор емкости ключ SW1 замыкался, воздействуя на DC-выключатель асимметричным током КЗ, а после достижения пика тока ключ SW2 замыкался, разряжая контур L_S-R_S через испытуемый DC-выключатель.

Приведенные испытательные схемы воспроизводят лишь начальный этап прерывания тока КЗ, но не учитывают второй этап гашения аварийного тока в цепи ОПН. Наличие различных испытательных схем разных производителей вынудило в [2] провести компьютерные расчеты по сопоставлению результатов испытаний в четырех испытательных схемах: 1-я – с накопительным конденсато-

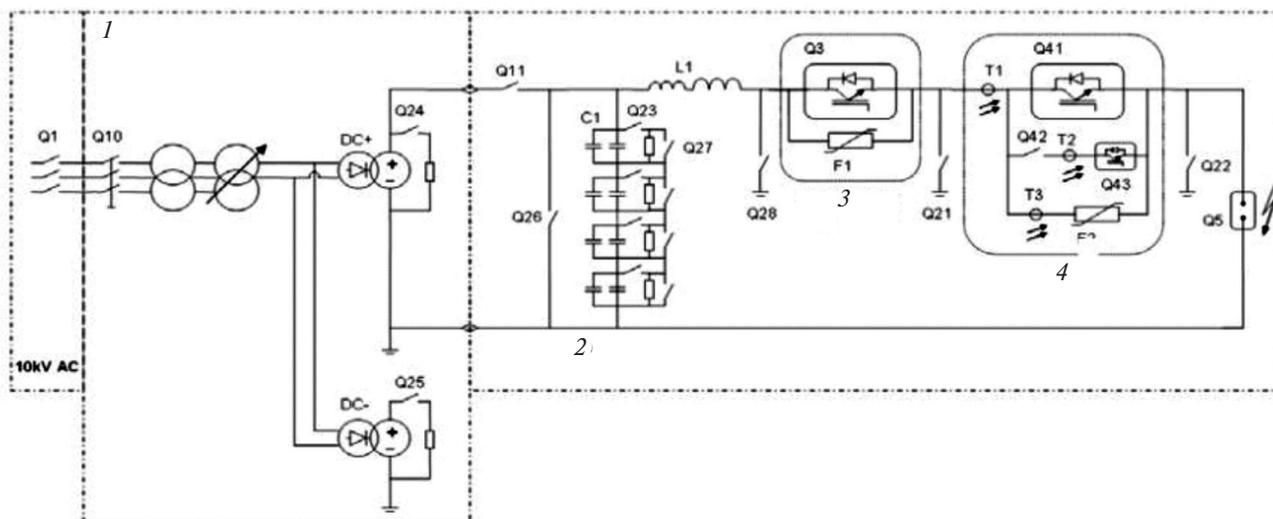


Рис. 5. Испытательная схема гибридного DC-выключателя фирмы АВВ

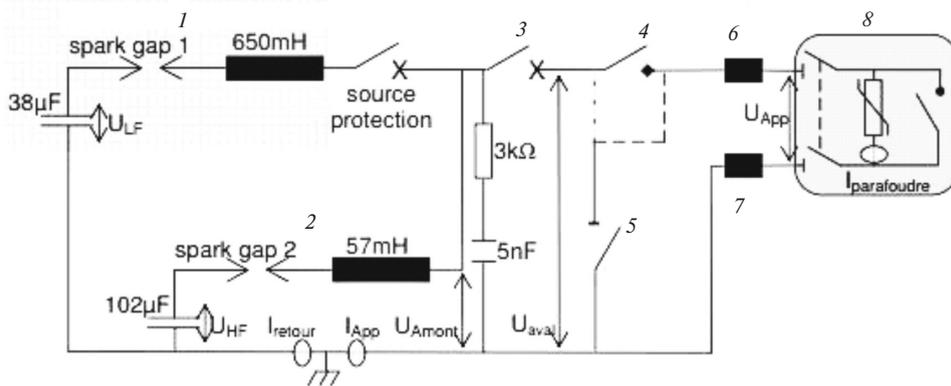


Рис. 6. Испытательная схема гибридного DC-выключателя фирмы Alstom

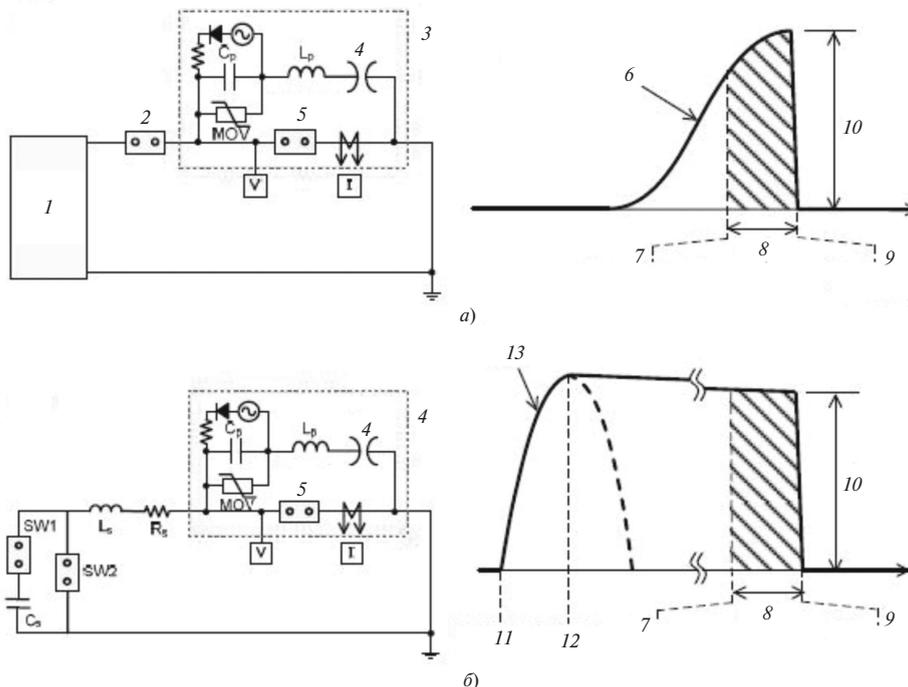


Рис. 7. Испытательная схема гибридного DC-выключателя фирмы Mitsubishi и формы токов: а – от AC-источника; б – от разряжаемой через реактор емкости

ром; 2-я – с разряжаемым через реактор конденсатором; 3-я – с ударным AC-генератором разной частоты (50 и 16,67 Гц); 4-я – с идеальным источником DC.

На рис. 8 приведены результаты расчета во времени воздействий на гибридный DC-выключатель с использованием четырех указанных схем, причем верхний график соответствует отключаемому току, средний – напряжению заряда источника; нижний – выделяемой в ОПН энергии гашения тока.

Характер разряда тока через DC-выключатель существенно различается как по времени быстрогодействия, так и по уровню выделяемой в ОПН энергии. Наибольшая энергия и длительность разряда получены в 4-м варианте схемы при использовании DC-источника, при этом выделяемая энергия в ОПН достигает 2,5 МДж и время гашения дуги 8 мс. Время выключения выключателей для

всех вариантов одинаково и составляет 3 мс. Наиболее близкие результаты к идеальному DC-источнику (4-й вариант) дает использование AC-источника пониженной частоты (3-я схема), в то время как 1-й и 2-й варианты схемы дают худшие результаты в части быстрогодействия и выделяемой энергии в ОПН, которые в 2 раза ниже, чем в 4-м варианте, для которого время гашения тока составляет 4 мс, а выделяемая энергия около 1 МДж. В результате использование различных испытательных схем и методик дает разные результаты, что требует стандартизации испытательных схем для сопоставительного анализа DC-выключателей разных производителей для отработки их наилучших конструкций [6, 7]. Амбициозная задача создания высоковольтной кабельной МСПТ напряжением свыше 200 кВ с длиной кабелей более 200 км и быстрогодействием выключателей менее 5 мс требует

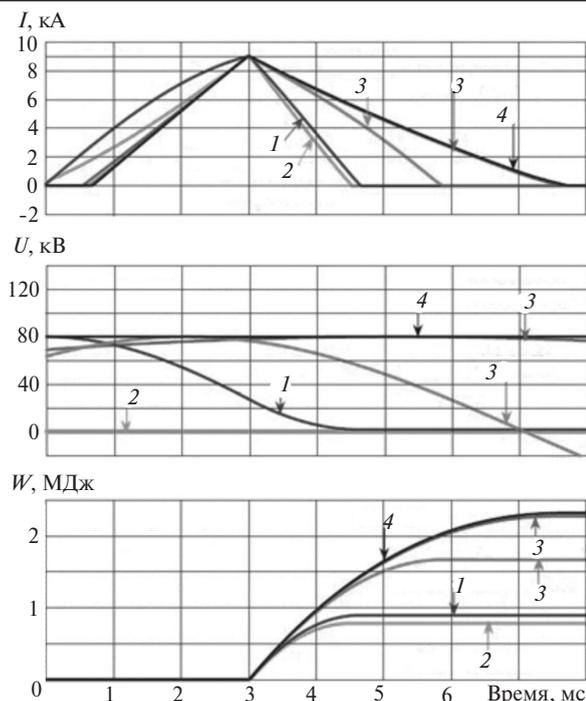


Рис. 8. Сравнительный анализ различных испытательных схем (1-я–4-я) для гибридных DC-выключателей

использования более дорогих, менее надежных и более габаритных DC-выключателей. Для отечественной практики создания кабельных МСПТ напряжением до 20 кВ с длиной кабелей до 20 км достаточно быстродействия 5–7 мс, что вполне реализуемо на основе активных конденсаторных

DC-выключателей и индукционно-динамического привода [3]. Рекомендуемая при этом испытательная схема должна соответствовать накопительному конденсатору, разряжаемому через реактор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сеть 2030**. Национальный взгляд (видение) на второе столетие электроэнергетики. Вашингтон, июль 2003, 31 с.
2. **Deliverable 1.3**: Synthesis of available studies on offshore meshed HVDC grids, 1 October 2016, 143 p.
3. **TU 16-674.068-86**. Выключатель постоянного тока вакуумный типа ВПТВ-15-5/400.
4. **Callavic M., Blomberg A., Hafner J., Jacobson B.** The Hybrid HVDC Breaker, ABB Grid Systems, Technical Paper, Nov. 2012, 10 p.
5. **Lin W., Jovic D., Nguetfeu S., Saad H.** Modelling of high-power hybrid DC circuit breaker for grid-level studies. — IET Power Electronics, 2016, vol. 9, No. 2, pp. 237–246.
6. **Erikson T., Backman M., Halen S.** A low loss mechanical HVDC breaker for HVDC grid and application. — Proc. of the Cigre Paris Session, Paris, 2014.
7. **Tokoyoda S., Sato M., Kamei K., Yoshida D., Miyashita M., Kikuchi K., Ito H.** High frequency interruption characteristics of VCB and its application to high voltage DC current breaker. — ICEPE-ST, Buhari, 2015.

[19.06.2017]

А в т о р: Шульга Роберт Николаевич окончил факультет машиностроения МВТУ им. Баумана в 1966 г. В 1970 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследования некоторых процессов, определяющих технические требования к отдельным видам оборудования электропередачи постоянного тока Экибастуз–Центр». Ведущий научный сотрудник Всероссийского электротехнического института.

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 11, pp. 30–35

DOI:10.24160/0013-5380-2017-11-30-36

Modeling and Test Schemes of DC Breakers for Multisubstation DC Grids

SHUL'GA Robert N. (All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia) — Leading Scientific Reseracher, Cand. Sci. (Eng.)

Problems of creation of hybrid DC breakers in relation to a problem of realization of cable multisubstation high and average voltage DC grids are considered. Models of hybrid breakers which allow to fulfill their design are investigated. Test schemes of breakers of various producers of the following types are compared: with the accumulative condenser, with a capacity discharged via the reactor and with a source of high and low frequency advantages of use of the last type of the scheme and need of standardization of test schemes to comparison of characteristics of hybrid breakers of a direct current are shown.

К е у w o r d s: hybrid breaker, multisubstation DC grid, test scheme, breaker model, standardization of test scheme

REFERCES

1. **Network 2030**. National view (vision) on the second century of electricity. Washington, July 2003, 31 p.
2. **Deliverable 1.3**: Synthesis of available studies on offshore meshed HVDC grids, 1 October 2016, 143 p.
3. **TU 16-674.068-86**. *Vyklyuchatel' postoyannogo toka vakuumnyi tipa VPTV-15-5/400* (Switch DC vacuum type VPTV-15-5/400).
4. **Callavic M., Blomberg A., Hafner J., Jacobson B.** The Hybrid HVDC Breaker, ABB Grid Systems, Technical Paper, Nov. 2012, 10 p.

5. **Lin W., Jovic D., Nguetfeu S., Saad H.** Modelling of high-power hybrid DC circuit breaker for grid-level studies. — IET Power Electronics, 2016, vol. 9, No. 2, pp. 237–246.
6. **Erikson T., Backman M., Halen S.** A low loss mechanical HVDC breaker for HVDC grid and application. — Proc. of the Cigre Paris Session, Paris, 2014.
7. **Tokoyoda S., Sato M., Kamei K., Yoshida D., Miyashita M., Kikuchi K., Ito H.** High frequency interruption characteristics of VCB and its application to high voltage DC current breaker. — ICEPE-ST, Buhari, 2015.

[19.06.2017]