

Выключатели постоянного тока для многоподстанционных сетей постоянного тока

ШУЛЬГА Р.Н., ИВАНОВ В.П.

Рассмотрены тенденции формирования многоподстанционных сетей постоянного тока (МСПТ) в виде кабельных и воздушных линий, а также преобразователей тока и/или напряжения, ключевыми элементами которых являются DC выключатели. Выполненный анализ требований, схемотехники и основных характеристик DC выключателей конденсаторного типа показал возможность их реализации для устройств среднего напряжения. Испытательные схемы DC выключателей требуют типизации и отличаются для различных производителей, что затрудняет сопоставление различных вариантов исполнения этих выключателей для выбора оптимальных технических решений. Для применения в кабельных МСПТ среднего напряжения рекомендуются недорогие и отработанные отечественные DC выключатели активного конденсаторного типа с вакуумными дугогасительными камерами и индукционно-динамическим приводом, которые удовлетворяют требованиям применения в МСПТ.

Ключевые слова: многоподстанционная сеть, постоянный ток, среднее напряжение, DC выключатель, характеристики

Строительство в нашей стране самых крупных в мире передач (ППТ) 1500 кВ Экибастуз–Центр длиной 2450 км мощностью 6 ГВт (1990 г.) и Выборгской вставки постоянного тока (ВПТ) (1984 г.) для создания остова энергосистемы ЕЭС послужило стартом к созданию многоподстанционная ППТ (МППТ) 1500 кВ Сибирь–Центр длиной 3600 км с четырьмя промежуточными подстанциями (ПС). Выполненные во Всероссийском электротехническом институте (ВЭИ) и Научно-исследовательском институте постоянного тока (НИИПТ) в 70–80 гг. прошлого века исследования показали, что для реализации высоковольтной радиальной МППТ необходима разработка DC выключателей с энергопоглощением от 30 до 50 МДж в зависимости от места установки, в то время как пропускная способность единичных ограничителей перенапряжений (ОПН-800) составляла 1,5 МДж. Решение проблемы было найдено при разработке и применении быстродействующих выключателей переменного тока, которые отключали ПС или участок ВЛ аварийной полупериода в бестоковую паузу с помощью системы управления, регулирования, защиты, автоматики (СУРЗА) с одновременной форсировкой неповрежденной полупериода, что не снижало энергоснабжение потребителей на стороне переменного тока. До 1985 г. наша страна была лидером мировой электроэнергетики в части применения ППТ, ВПТ, СТК, мощных испытательных стендов (МИС) и других устройств гибких электропередач (ГЭП), отражением чего было проведение в Москве на базе ВЭИ Всемирного конгресса

ВЭЛК. События в 90-х годах привели к развалу отечественной промышленности и отставанию электроэнергетики, приведшему к лидированию фирмы АВВ, а с начала 2000-х годов – фирмы Сименс в мировой электроэнергетике.

Системные цепные аварии по всему миру, локальные войны и природные катастрофы, начиная с 2000-х годов, привели к необходимости замены сети переменного тока на сеть постоянного тока (СПТ), а в общей системе – к необходимости перехода от внедрения устройств гибких электропередач (ГЭП) в АС сети к построению сетей DC/AC, в которых источники и нагрузки относятся к АС, а «остов» – к DC.

Широкое распространение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и накопителей электроэнергии (НЭЭ), а также распределенной генерации в дополнение и отчасти замене централизованной традиционной генерации привели к пониманию, что сеть постоянного тока является безальтернативным способом повышения надежности энергоснабжения, подтвержденным на двух последних сессиях СИГРЭ. В [1] показано, что США располагают примерно 250 тыс. км ВЛ 230 кВ и выше. Потери мощности в среднем составили в 1970 г. 5% и выросли в 2001 г. до 9,5% из-за повышенной нагрузки. Ежегодный ущерб от отключений передаваемой мощности и снижения качества электроэнергии достигает 180 млрд долл. и с каждым годом растет несмотря на применение ГЭП. В качестве базовой предполагается создание к 2030 г. сверхпроводящей сети постоянного тока по пери-

метру страны с объединением региональных, местных, мини- и микросетей. В Европе [2] предполагается к 2050 г. объединить оффшорные узлы в 11 странах, расположенных вокруг Северного моря, которые соединяют ряд малых (15 ГВт) и больших (115 ГВт) сетей, с помощью смешанной кабельной сети в виде многоподстанционной сети постоянного тока HVDC большой протяженности (МСПТ). Известно, что экономическая длина кабельной линии (КЛ) из-за высокой зарядной мощности ограничена длиной 30–50 км. Применение КЛ большой протяженности в сотни километров с десятками ПС требует использования преобразователей напряжения (ПН), создающих на стороне DC такие же, как и кабели, емкостные нагрузки. Если в Европе и США планируется создать кабельные МСПТ, то в Китае и Индии предполагается объединить радиальные передачи постоянного тока (ППТ) с длинными ВЛ и преобразователями тока (ПТ) с помощью МСПТ напряжением до 1600–2200 кВ, которые синтезируют российский опыт и зарубежные технологии.

Технико-экономическая целесообразность МСПТ дополнительно обусловлена передачей между узлами лишь трех параметров с помощью системы скалярных измерений вместо восьми параметров в системе векторных измерений на переменном токе [3, 4]. В структуру МСПТ наряду с кабельными и воздушными ППТ могут входить ВПТ с НЭЭ, выполненными на основе преобразователей тока с использованием тиристоров, а в ряде случаев – более дорогих преобразователей напряжения на базе приборов IGBT, которые позволяют работать на слабую или пассивную нагрузку [5].

Как показано в [5], в МСПТ могут входить кластеры, содержащие ВИЭ, доля которых несомненно будет возрастать как в регионах централизованного энергоснабжения, так и в удаленных автономных районах. В любом случае построение структуры МСПТ невозможно осуществить без DC выключателей.

Схемотехника DC выключателей. Для DC выключателей на средние напряжения вплоть до 20 кВ обычно используется конденсаторная схема с незаряженным или с предварительно заряженным конденсатором, приведённая на рис. 1.

При возникновении аварии контакты выключателя 1 размыкаются, а замыкатель 2 включается. Колебания тока LC-цепи накладываются на основной ток в цепи 1, который переходит через нуль при достижении амплитуды противотока выше отключаемого тока, так что дуга в цепи гаснет в нуле суммарного тока. Запасённая в индуктивностях энергия выделяется в ОПН 5, и на следующем этапе разъединитель 3 отделяет аварийный участок от

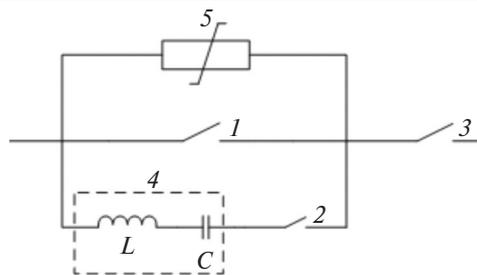


Рис. 1. Схема конденсаторного DC выключателя: 1 – обычный АС выключатель преимущественно с вакуумными камерами; 2 – замыкатель; 3 – разъединитель; 4 – LC-цепь с предварительно заряженным или незаряженным конденсатором; 5 – ОПН

сети. Возможны два варианта реализации схемы: пассивный без замыкателя 2 и активный с замыкателем 2 и противоположным предварительным зарядом конденсатора С.

Такой DC выключатель имеет низкую стоимость, высокий ресурс и малые потери. Его время быстроедействия, желаемое значение которого оценивается для высоковольтных DC выключателей 3–10 мс, определяется типом привода. Последние разработки ABB и Mitsubishi для этих выключателей продемонстрировали отключение тока 10 кА при напряжении 80 кВ за 5 мс [6, 7].

Полупроводниковый DC выключатель (рис. 2) содержит два вентиля обратной полярности D1 и D2, включённых параллельно IGBT приборам S1, S2, а также ОПН SA1 и SA2. Время выключения достигает 1 мс или менее. Однако высокая стоимость IGBT приборов при большом числе DC выключателей ограничивает их применение, также как их высокое прямое сопротивление в миллиомах сравнительно с микроомами для конденсаторных выключателей, приводит к росту потерь в ПН на 30%.

Снижение потерь в полупроводниковом DC выключателе достигается применением гибридного DC выключателя, схема которого приведена на рис. 3.

В нормальном режиме ток проходит через механический выключатель 3 и вспомогательный вентиль 2. При аварии вспомогательный вентиль 2, закрываясь, переводит ток в главный вентиль 1, создавая падение напряжения на уровне 3–4 кВ. Пол-

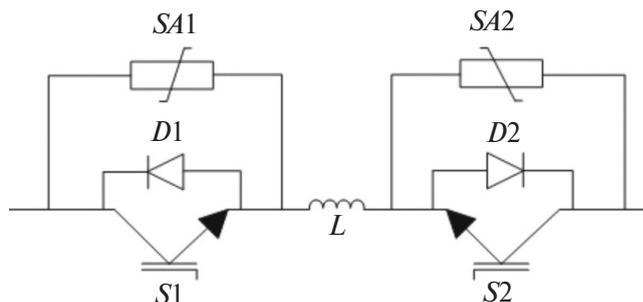


Рис. 2. Схема полупроводникового DC выключателя

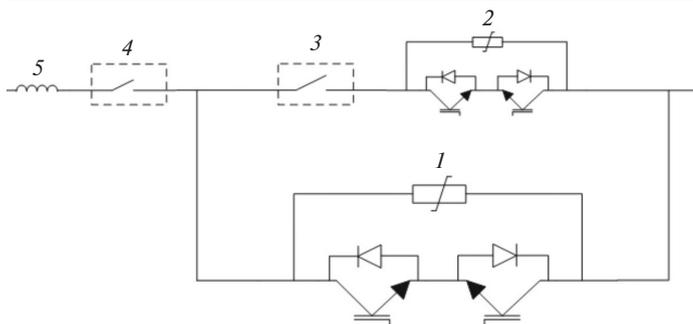


Рис. 3. Гибридный DC выключатель: 1 – главный выключатель; 2 – вспомогательный вентиль; 3 – механический выключатель; 4 – вспомогательный выключатель; 5 – токоограничитель

ная энергия разряда выделяется на ОПН, входящем в состав главного вентиля 1. Вспомогательный выключатель 4, размыкаясь, защищает ОПН от перегрева и обеспечивает изоляцию DC выключателя от остальной системы. Преимущества гибридного DC выключателя состоит в том, что номинальный ток не проходит через главный выключатель 1 и он остается в холодном состоянии, позволяющем повысить пропускную способность полупроводниковых приборов. Указанный выключатель позволяет снизить время коммутации до 2–3 мс, что важно для применения в кабельных МСПТ, хотя и сопряжено с повышением стоимости и площади размещения такого выключателя.

Данные по отключающей способности DC выключателей [2]. Отключающая способность существующих и разрабатываемых DC выключателей при различных временах отключения приведена на графике рис. 4.

График имеет качественный характер, так как токи отключения по оси ординат могут значительно отличаться для различных опытных образцов и схем испытаний. В качестве базы принят ток отключения, равный 5 кА для конденсаторного выключателя напряжением 15 кВ [8].

В таблице приведены данные по отключающей способности, напряжению и быстродействию конденсаторных и гибридных DC выключателей основных зарубежных фирм.

Приведенные данные показывают, что для кабельных МСПТ низкого и среднего напряжения с учетом отключающей способности и стоимости

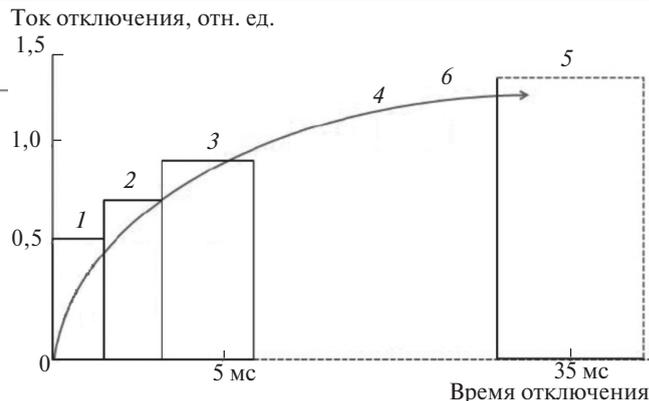


Рис. 4. Ток отключения для существующих и разрабатываемых DC выключателей при различном времени отключения: 1 – полупроводниковый выключатель; 2 – гибридный выключатель; 3 – быстрый конденсаторный DC выключатель; 4 – перспективы повышения отключающей способности; 5 – традиционный механический DC выключатель

наиболее рационально использовать конденсаторные DC выключатели; гибридные типы менее проработаны, менее надежны, имеют высокую стоимость и значительные габариты, позволяющие их использовать для высоковольтных сетей, хотя и с рядом ограничений.

Возможности применения DC выключателей. Возможности применения существенно зависят от характера расчётных испытательных схем, которые до настоящего времени не стандартизованы, а используются схемы из уже существующих в разных фирмах. Описание различных испытательных схем приведено в [9], где рассматриваются четыре типа испытательных схем: 1 – с накопительным конденсатором; 2 – с накопительным реактором; 3 – с «ударным» генератором АС разной частоты (50 Гц и 16,67 Гц), 4 – идеальный источник DC.

На рис. 5 приведены результаты сравнительного анализа моделирования DC выключателя в четырёх указанных испытательных схемах: рис. 5,а – отключаемый ток рис. 5,б – напряжение заряда источника; рис. 5,в – накопленная в ОПН выключателя энергия. Следует отметить, что варианту фирмы Mitsubishi на рис. 5 соответствуют две кривые 3, которые заметно различаются по длительности разряда для схемы от источника АС пониженной частоты и от разряжаемого через реактор накопительного конденсатора.

Тип DC выключателя	Фирма	Номинальное напряжение, кВ	Отключаемый ток, кА	Быстродействие, мс	Стоимость
Конденсаторный активный	ABB	80	2–10,5	5	Низкая
	Hyosung	4,4	5	2	То же
	Mitsubishi	–	4-16	8–10	–
Гибридный	ABB	80	9 (3,5 кА/с)	2	Высокая
	Alstom	120	5,2	2,2–5,3	–
	CEPRI	200 (4×50)	15 (5 кА/с)	3	–

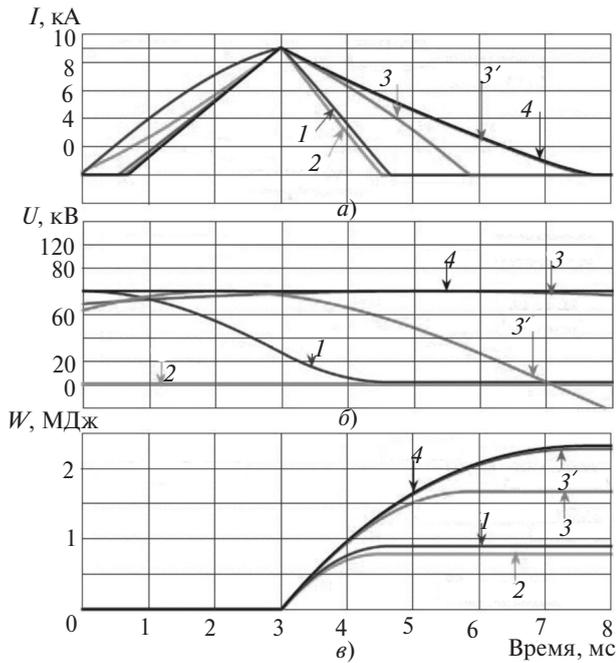


Рис. 5. Сравнительный анализ моделирования DC выключателя в разных испытательных схемах

Характер процессов существенно различается как в части быстродействия, так и уровня выделяемой энергии. Наиболее близкие результаты по всем показателям к идеальному DC источнику 4 даёт использование AC генератора пониженной частоты 3 (3' отличается от 3 разрядом колебательного контура), в то время как накопительный реактор 2 и в меньшей степени накопительный конденсатор 1 дают худшие результаты. В результате использование характеристик DC выключателей разных производителей, приведённых в таблице, существенно различаются и требуется стандартизация испытательных схем для сопоставления вариантов и выбо-

ра наиболее рациональных типов DC выключателей [6, 7].

Следует отметить, что амбициозная задача создания высоковольтной кабельной МСПТ напряжением 200 кВ с длиной кабелей более 200 км и быстродействием 5 мс и менее требует использования более дорогих, менее надёжных и более габаритных гибридных DC выключателей. Для отечественной практики создания кабельных МСПТ напряжением до 20 кВ с длиной кабелей до 20 км достаточно быстродействие на уровне 10 мс, что вполне реализуемо на основе активных конденсаторных DC выключателей.

Отечественные DC выключатели. Отечественные выключатели вполне соответствуют требованиям создания МСПТ среднего напряжения. В ВЭИ на протяжении многих лет разработаны указанные DC выключатели для железнодорожного транспорта на 4 кВ, кабельных сетей 10, 15, 20 кВ, для ускорителей и накопителей электроэнергии на напряжения до 200 кВ и коммутируемые токи до 50 кА.

На рис. 6,а приведен габаритный чертёж конденсаторного DC выключателя [8] и принципиальная схема указанного выключателя. Характеристики указанного выключателя постоянного тока типа ВПТВ-15-5/400: номинальное напряжение 15 кВ (максимальное 20 кВ), номинальный ток 400 А, ток отключения 5 кА, время отключения 3–7 мс, время включения менее 100 мс, коммутационная стойкость 10 тыс. коммутаций, срок службы 10 лет.

Если зарубежные МСПТ высокого напряжения создаются на базе преобразователей напряжений и кабелей большой протяженности, которые могут изменять полярность рабочего напряжения, то оте-

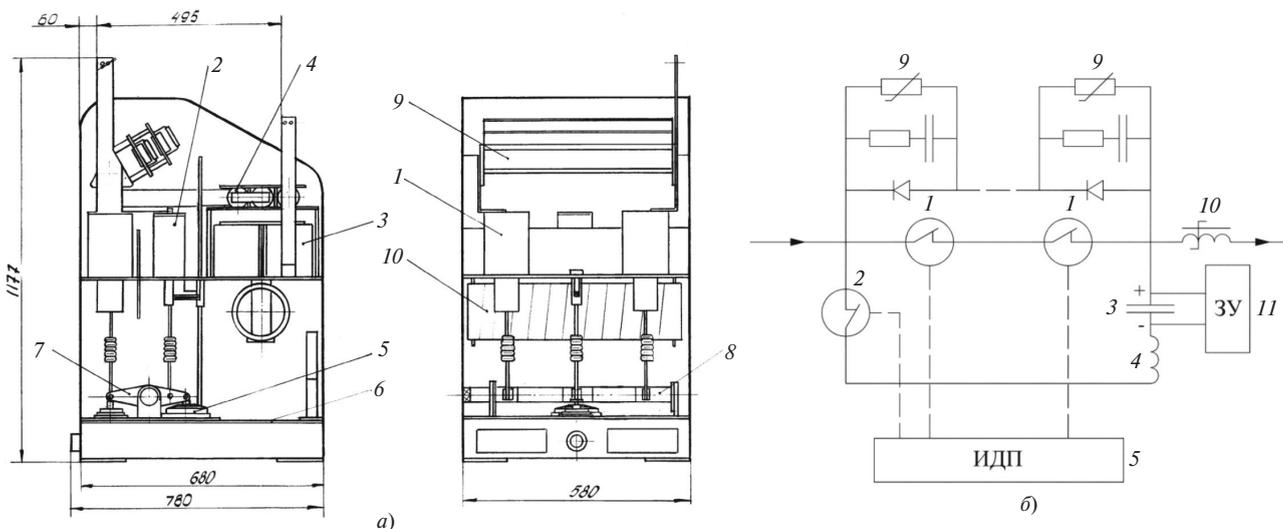


Рис. 6. Конденсаторный активный DC выключатель: а – габаритный чертёж; б – принципиальная схема: 1 – вакуумная дугогасительная камера основного контура; 2 – вакуумная дугогасительная камера противотока; 3 – конденсатор; 4 – индуктивность; 5 – индукционно-динамический привод; 6 – опорная плита; 7 – рычаг; 8 – вал; 9 – диодный блок; 10 – дроссель; 11 – зарядное устройство

чественные МСПТ для нужд городов и спецобъектов должны быть среднего напряжения (до 20 кВ), с небольшой длиной КЛ и ВЛ, содержать преимущественно преобразователи тока и накопители электроэнергии (для компенсации реактивной мощности и повышения надежности потребителей) практически без перемены полярности. Реализация таких сетей требует не столько быстрого действия, сколько дешевых и малогабаритных DC выключателей, что вполне реализуемо на существующей базе вакуумных дугогасительных камер ВДК 6, 10, 35 кВ, индукционно-динамических приводов и дешевых электрических элементов. Энергоемкость используемых ОПН должна составлять десятки кДж в зависимости от протяженности КЛ и уровня рабочего напряжения, что позволит снять ограничения по их термической стойкости и времени охлаждения, снимающих проблему применения АПВ для ВЛ, в то время как для КЛ применение АПВ нецелесообразно из-за малой вероятности возникновения открытых дуговых разрядов.

Вывод. В настоящее время существует две тенденции формирования МСПТ: высоковольтные КЛ (США и Европа) и высоковольтные ВЛ (Китай и Индия), а также кабельные линии среднего напряжения (Россия и др.) для городов и спецобъектов. Ключевыми элементами МСПТ являются DC выключатели. Гибридный DC выключатель имеет пониженное сопротивление в проводящем состоянии, однако слишком дорог, менее надежен, имеет большие габариты и сложный алгоритм работы. Опытные образцы указанных выключателей не могут претендовать на установку в качестве многочисленных выключателей по концам линий и подстанций в МСПТ.

Испытательные схемы DC выключателей требуют типизации и отличаются для различных производителей, что затрудняет сопоставление разных вариантов исполнения этих выключателей для выбора оптимальных технических решений.

Для применения в кабельных МСПТ среднего напряжения рекомендуются недорогие и отработанные отечественные DC выключатели активного

конденсаторного типа с вакуумными дугогасительными камерами и индукционно-динамическим приводом, которые удовлетворяют требованиям применения в МСПТ.

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 октября 2016, 127 библиографических ссылок, 143 с.
3. **Измайлов С.В., Шульга А.Р., Шульга Р.Н.** Новые подходы к созданию энергоинформационных распределительных систем. — Электротехника, 2014, № 2, с. 39–44.
4. **Измайлов С.В., Шульга А.Р., Шульга Р.Н.** Реализация облачной информационной технологии для контроля, мониторинга и управления распределительными энергосистемами. — Электротехника, 2013, № 12, с. 52–57.
5. **Шульга Р.Н.** К вопросу о возможности создания гибридной энергораспределительной сети ГЭРС с накоплением электроэнергии. — Новости российской электроэнергетики, 2015, № 12, с. 22.
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, Buan, 2015.
8. **ТУ 16-674.068-86.** Выключатель постоянного тока вакуумный типа ВПТВ-15-5/400/.
9. **Шульга Р.Н.** Моделирование и испытательные схемы выключателей постоянного тока для многоподстанционных сетей постоянного тока. — Электричество, 2017, № 11, с. 30–35.

[25.07.2018]

А в т о р ы: Шульга Роберт Николаевич окончил факультет машиностроения Московского высшего технического училища 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» во Всероссийском электротехническом институте (ВЭИ). Ведущий научный сотрудник ВЭИ-филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ».

Иванов Валерий Павлович окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1972 г. Главный специалист ВЭИ-филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ».

DC Circuit Breakers for Multisubstation DC Networks

SHUL'GA Robert N. (All-Russian Institute of Electrical Engineering (ARIEE), Moscow, Russia) — Leading scientific researcher, Cand. Sci. (Eng.)

IVANOV Valery P. (ARIEE, Moscow, Russia) — Chief Specialist

The article considers trends relating to the development of multistation DC (MSDC) networks in the form of cable and overhead power lines along with current and/or voltage converters, with DC circuit breakers serving as their key components. The requirements, circuit solutions, and main characteristics of capacitor-type DC circuit breakers were analyzed, and it has been shown from the performed analysis that it is possible to make them for medium-voltage devices. The DC circuit breaker test circuit arrangements need standardization and differ from each other for different manufacturers, a circumstance that adds difficulty to comparison of different makeup versions of these circuit breakers for selecting the optimal technical solutions. For application in medium-voltage cable MSDC networks, it is recommended to use cheap and well-matured domestically produced capacitor-type DC circuit breakers equipped with vacuum arc quenching chambers and an induction-dynamic drive, which satisfy the requirements of using them in MSDC networks.

Key words: multistation network, direct current, medium voltage, DC circuit breaker, characteristics

REFERENCES

1. «Set' 2030»: National'nyi vzglyad (videniye) na vtoroye stoletiyе elektroenergetiki («A 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. October 1, 2016, 127 bibl., 143 p.
3. **Izmailov S.V., Shul'ga A.R., Shul'ga R.N.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2014, No. 2, pp. 39–44.
4. **Izmailov S.V., Shul'ga A.R., Shul'ga R.N.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2013, No. 12, pp. 52–57.
5. **Shul'ga R.N.** *Novositi rossiiskoi elektroenergetiki – in Russ. (News of Russian Power Industry)*, 2015, No. 12, 22 p.
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, Buhan, 2015.
8. **TU 16-674.068-86.** *Vyklyuchatel' postoyannogo toka vakuumnyi tipa UPTV-15-5/400/* (Technical requirements 16-674.068-86. The switch of direct-current vacuums type VPTV-15-5/400).
9. **Shul'ga R.N.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 11, pp. 30–35.

[25.07.2018]