

Развитие распределительных устройств высокого и сверхвысокого напряжения

УДК 621.3

Вариводов В.Н.

д.т.н., профессор,
действительный член РАЭН,
заместитель Генерального
директора АО «НПО ВЭИ-
Электроизоляция»

Ковалев Д.И.

ассистент кафедры ТЭВН
НИУ «МЭИ»

Крупенин Н.В.

к.т.н., генеральный
директор АО «НПО ВЭИ-
Электроизоляция»

Хренов С.И.

к.т.н., доцент, заведующий
кафедрой ТЭВН НИУ «МЭИ»

Развитие распределительных устройств (РУ) высокого и сверхвысокого напряжения отражает общие тенденции совершенствования электрических сетей: повышение надежности, управляемости, компактности, экологичности и безопасности, снижение затрат на обслуживание, оптимизацию технико-экономических характеристик. Состоявшаяся в 2016 году в Париже сессия CIGRE несколько меняет понимание современного развития РУ высокого и сверхвысокого напряжения.

В соответствии с материалами CIGRE [1] в последние годы изменились требования к подстанционному оборудованию, прежде всего в части социальных аспектов установки и эксплуатации подстанций, а также возможного загрязнения окружающей среды:

- гармоничное внедрение высоковольтных комплексов в формирование безопасной и комфортной жизни;
- защита окружающей среды, эффективное использование природных ресурсов;
- учет все большей концентрации населения в городах;
- усиление внимания общества к надежному и бесперебойному электроснабжению;

- тенденция к повышению номинального напряжения и передаваемой мощности;
- необходимость улучшения доступа к электроснабжению.

Применение более надежного оборудования, не требующего ремонта практически в течение всего срока службы, должно не только увеличивать элементную надежность РУ, но и обеспечивать переход к упрощенным схемам и компоновкам распределительных устройств и, соответственно, еще большему повышению надежности распределительных устройств в целом.

Ключевыми направлениями повышения надежности высоковольтного оборудования РУ являются:

Ключевые слова:

распределительные устройства, электрическая сеть, надежность, высоковольтная ячейка

Keywords:

switchgear, electrical grid, reliability, high voltage unit



Рис. 1. КРУЭ 220 кВ на подстанции «Койсуг»



- снижение отрицательного воздействия на оборудование со стороны внешней среды;
- использование новых более эффективных изоляционных и механических систем.

Снижение отрицательного эффекта от воздействия внешней среды достигается, в первую очередь, герметизацией высоковольтных цепей и, прежде всего, как наиболее уязвимых, контактных соединений и приводов, а также подземным исполнением ПС, что, как известно, реализуется, например, для таких известных компактных распределительных устройствах как КРУЭ (рисунок 1).

Более эффективными изоляционными и механическими системами являются элементы РУ, обладающие по сравнению с традиционными более высокими удельными прочностными характеристиками и меньшим разбросом параметров. Здесь можно отметить высокопрочные электрические газы (например, элегаз, различные газовые смеси, в том числе на основе флюоронитрилов и кетонов), новые полимерные материалы с улучшенными характеристиками (эпоксидные и кремнеорганические компаунды, этилен-пропиленовые каучуки), а также небольшие усовершенствованные электромагнитные и пружинно-моторные приводы для коммутационных аппаратов с высокой удельной мощностью.

Повышение управляемости распределительных устройств высоковольтных подстанции в аспекте широко принятой сейчас в литературе терминологии означает создание и применение «smart» (или «умного») оборудования и РУ в целом.

Для исключения зависимости безаварийной работы РУ от «человеческого фактора» технологическая составляющая в управлении распределительными устройствами должна возрастать. Важно также, чтобы применяемое силовое оборудование было адаптировано к новейшим автоматизированным системам управления, защиты и мониторинга подстанций и электрических сетей.

Наиболее перспективным направлением развития элементной базы систем управления, защиты и мониторинга распределительных устройств является применение приборов вторичных систем, поддерживающих обмен данными по протоколу МЭК 61850, что существенно повышает возможности быстрой и объемной передачи информации.

Повышение управляемости РУ связано с использованием мониторинга состояния оборудования распределительных устройств в режиме online, внедрении неразрушающих методов испытаний, применении единых (интегрированных в АСУ ТП) информационно-диагностических систем для

получения оперативного доступа к информации о состоянии оборудования.

Повышение компактности распределительных устройств в последние годы в основном достигается за счет:

- применения новых изоляционных и дугогасительных сред (в первую очередь высокопрочных в электрическом отношении газов и полимерных диэлектриков);
- создания гибридных многофункциональных высоковольтных аппаратов и перехода к модульному построению распределительных устройств;
- использования нетрадиционных измерителей тока и напряжения;
- оптимизации конструкции отдельных высоковольтных устройств и общей их компоновки.

В этом отношении следует отметить, что в настоящее время

существуют три основных типа комплектно-распределительных устройств: воздушные, газонаполненные и недавно появившиеся, но быстро развивающиеся КРУ с твердой изоляцией. Иногда применяются и комбинированные устройства.

Воздушные КРУ (рисунок 2) в мировой практике нашли применение в распределительных сетях 6–72,5 кВ. Эти КРУ характеризуются шкафным исполнением.

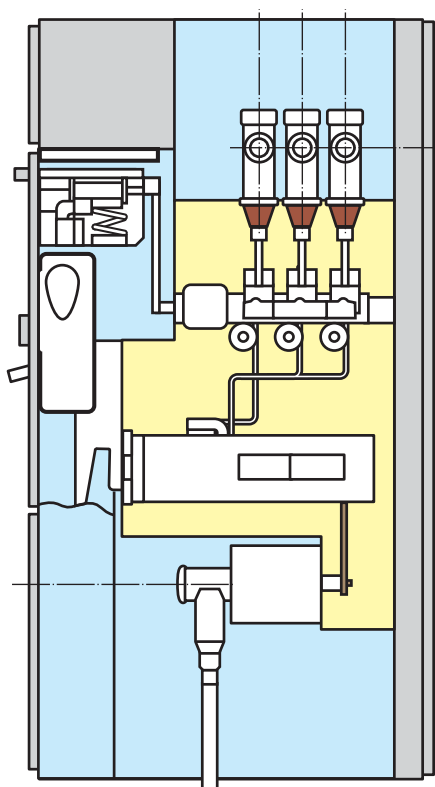


Рис. 3. Принципиальная конструкция газонаполненного КРУ шкафного типа (желтым цветом показан герметизированный газонаполненный отсек)

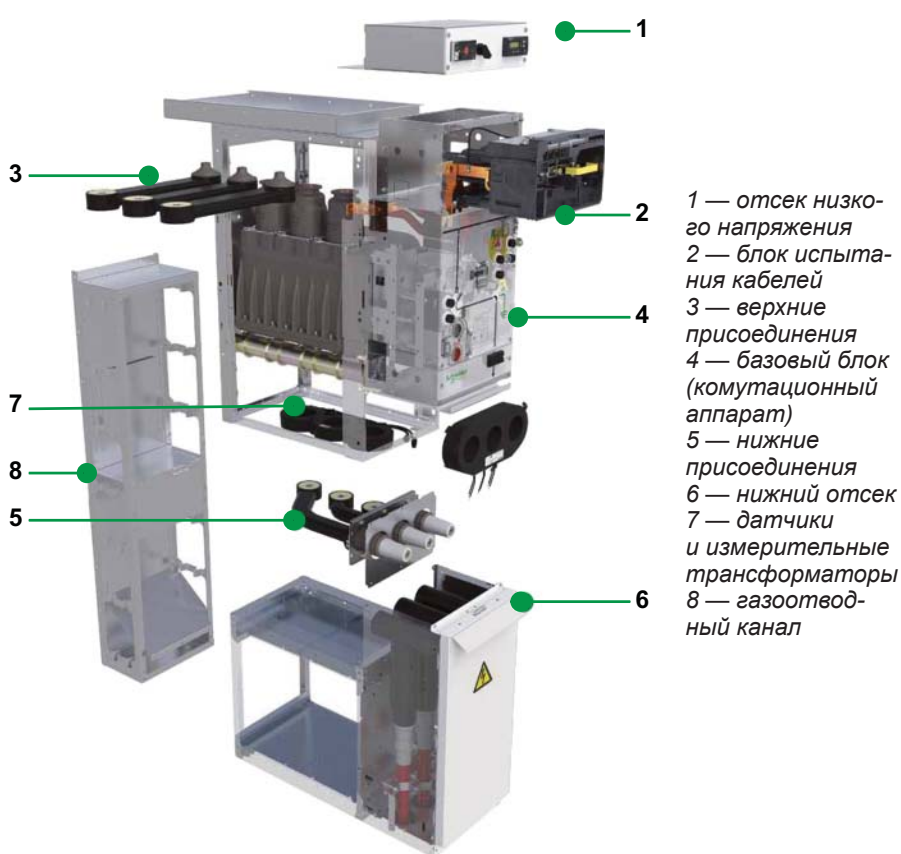
Основным достоинством КРУ с воздушной изоляцией является простота и как результат — достаточно низкая стоимость.

К недостаткам следует отнести большие габариты ячеек, влияние атмосферы на характеристики изоляции и приводов КРУ, возможность возникновения межфазных коротких замыканий.

Газонаполненные КРУ имеют два основных исполнения: трубчатое (все элементы такого КРУ имеют корпус в виде трубы или шара — рисунок 1) или шкафное (где хотя бы один отсек в шкафу герметизирован и заполнен специальным высокопрочным газом — рисунок 3).

Как правило в газонаполненных КРУ шкафного исполнения коммутационный модуль герметизирован и находится в атмосфере элегаза или другого высокопрочного газа (рисунок 2). Как правило, все остальные элементы располагаются в твердой изоляции. Такая конструкция КРУ резко снижает его габариты.

Кроме малых габаритов к достоинствам газонаполненных КРУ следует отнести отсутствие



1 — отсек низкого напряжения
2 — блок испытания кабелей
3 — верхние присоединения
4 — базовый блок (коммутационный аппарат)
5 — нижние присоединения
6 — нижний отсек
7 — датчики и измерительные трансформаторы
8 — газоотводный канал

Рис. 4. Конструкция ячеек КРУ с твердой экранированной изоляцией на средние классы напряжения фирмы Schneider

влияния атмосферы на характеристики устройства, а к недостаткам — относительно большую стоимость.

На рисунке 4 представлена принципиальная конструкция КРУ на средние классы напряжения 10–35 кВ с экранированной твердой изоляцией. Вся поверхность всех элементов в этом случае покрыта твердой изоляцией, имеющей на поверхности заземленный экран.



Рис. 5. Конструкция ячейки КРУ шкафного типа с комбинированной изоляцией

Применение такой системы изоляции также позволяет существенно снизить габариты КРУ и значительно повысить безопасность, поскольку в шкафу КРУ исключено прикосновение к высоковольтным элементам даже в процессе его работы.

Все токоведущие части в этих ячейках имеют твердую изоляцию из эпоксидной смолы или EPDM (этилен-пропиленового каучука). Это позволяет исключить влияние окружающей среды и обеспечивает:

- защиту от агрессивного влияния влажности, пыли и других веществ при тяжелых условиях эксплуатации;
- значительное сокращение риска возникновения межфазных коротких замыканий.

Экранированная твердая изоляция продлевает срок службы оборудования, тем самым уменьшая стоимость обслуживания. Поскольку ни один элемент первичной цепи не имеет контакта с окружающим воздухом, то снижается риск возникновения внутренней дуги; существенно уменьшается необходимость

в техническом обслуживании; повышается безопасность.

Следует отметить, что при переходе от средних номинальных напряжений к высоким и сверхвысоким возможно применение комбинированных ячеек, где наряду с твердой экранированной изоляцией применяются и элементы с металлической оболочкой, как это показано на рисунке 5 (коммутационный аппарат выполнен в металлическом корпусе). Также, как и в ячейках с экранированной твердой изоляцией, в этом случае все элементы ячейки внутри шкафа на поверхности имеют нулевой потенциал.

На рисунке 6 приведена зависимость усредненного по литературным данным объема максимальных по размеру современных ячеек с силовым выключателем различного типа.

Как видно из представленных данных объем традиционных ячеек с воздушной изоляцией в 3–5 раз превышает объем современных ячеек КРУ с твердой изоляцией и газонаполненных ячеек на номинальное напряжение 1–35 кВ и более чем в 10 раз объем газонаполненных ячеек на напряжение 110 кВ.

Объем газонаполненных ячеек на средние классы напряжения примерно в 1,5 раза меньше, чем объем ячеек с твердой изоляцией, что обусловлено тем, что ячейки с твердой экранированной изоляцией, как правило, разрабатываются в пофазном исполнении, что несколько увеличивает их объем по сравнению с газонаполненными ячейками, где все три фазы коммутационных аппаратов располагаются почти всегда в одном газовом отсеке.

Следует отметить, что пофазное исполнение ячеек исключает возможность межфазных коротких замыканий, поэтому, несмотря на некоторое увеличение габаритов ячеек КРУ с твердой изоляцией, они вполне конкурентоспособны по сравнению с газонаполненными ячейками.

Таким образом, применение высокопрочных газов и твердых

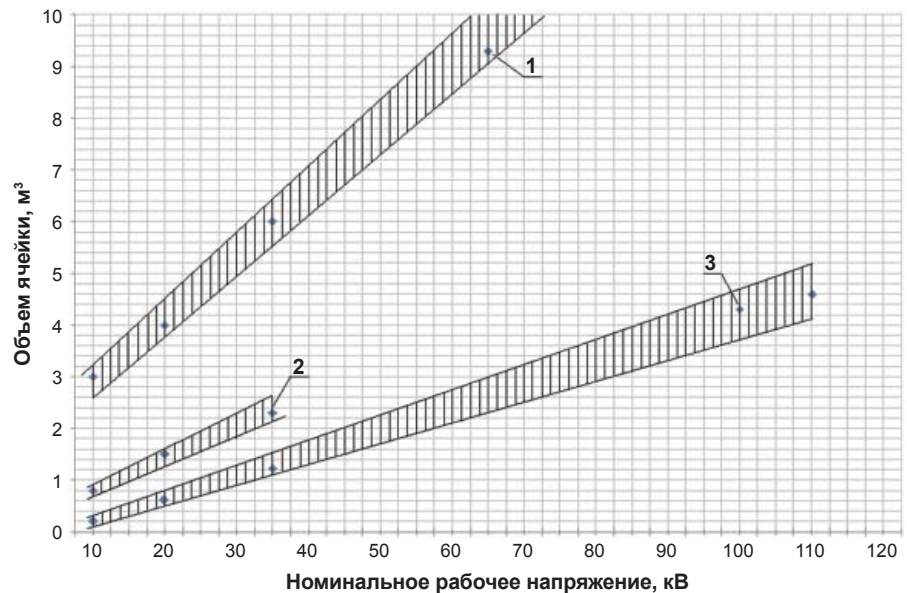


Рис. 6. Зависимость среднего объема ячейки КРУ с силовым выключателем от максимального рабочего напряжения по данным ведущих фирм для различного типа исполнения ячеек: 1 — воздушные ячейки, 2 — ячейки с твердой изоляцией и проводящим экраном, 3 — газонаполненные ячейки

диэлектриков позволяет значительно сократить габариты РУ.

Основным высокопрочным газом, применяемым в газонаполненных КРУ в течение последних 40–50 лет был элегаз (SF_6).

Однако применение элегаза ограничено Киотским протоколом, поскольку он влияет на экологию планеты: способствует формированию озоновых дыр и парникового эффекта в атмосфере, имея высокий коэффициент глобального теплового потенциала.

Для снижения воздействия на окружающую среду и повы-

шения безопасности проводятся интенсивные исследования по выбору альтернативных SF_6 газов [2, 7, 8].

В 2014 году было предложено использовать смесь флюоронитрила ($(\text{CF}_3)_2\text{CFCN}$) и углекислого газа. Применение этой смеси с 6% флюоронитрила позволяет на 98% снизить влияние на атмосферу и парниковый эффект по сравнению с использованием элегаза. Эта газовая смесь не влияет также на формирование озоновых дыр. Следует отметить, что электрическая прочность флюоронитрила выше прочности элегаза (рисунок 7).

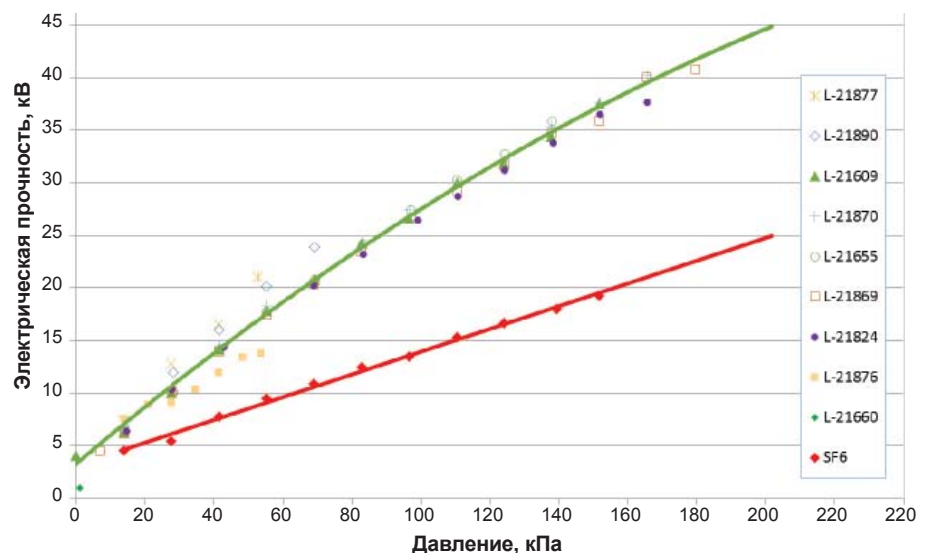


Рис. 7. Электрическая прочность флюоронитрилов (зеленая кривая) и элегаза (красная линия) в зависимости от давления [8]

Другой возможной альтернативой для элегаза являются кетоны — C5 ketone и C6 ketone [2], предложенные для применения в качестве изолирующего газа несколько ранее, и сравнительные характеристики которых приведены в таблице 1.

Таким образом, наиболее интересными для применения в высоковольтной аппаратуре как альтернатива элегазу в настоящее время являются различные смеси флюоронитриловых газов, или кетонов (чистые новые газы не удовлетворяют требованиям по температуре кипения).

На рисунке 8 приведены газонаполненные КРУ трубчатого и шкафного типа, где в качестве основной изоляции использованы смеси кетонов [3].

Для повышения экологичности КРУ даже на номинальное напряжение 66–110 кВ в газонаполненных ячейках начинает применяться вместо элегаза сухой технический воздух (рисунок 9).

Важным направлением создания более компактных распределительных устройств являются гибридные многофункциональные высоковольтные ап-

Табл.1. Физические свойства различных газов

| Газ | Молекулярный вес | Диэлектрическая прочность по отношению к SF ₆ | Точка кипения (°C) | Коэффициент глобального теплового потенциала | Токсичность |
|---------------------------------|------------------|--|--------------------|--|-------------|
| CO ₂ | 44 | 0,45 | -78,5 | 1 | нет |
| N ₂ | 14 | 0,4 | -196 | 0 | нет |
| Воздух | 29 | 0,5 | -194 | 0 | нет |
| CF ₄ | 88 | 0,46 | -128 | 6,630 | нет |
| C ₂ F ₆ | 138 | 0,78 | -78 | 11,100 | нет |
| C ₃ F ₈ | 188 | 0,96 | -37 | 8,900 | нет |
| c-C ₄ F ₈ | 200 | 1,25 | -6 | 9,540 | нет |
| CF ₃ I | 196 | 1,2 | -22,5 | 5 | да |
| Кетон C ₅ | 266 | 1,3 | 24 | 1 | нет |
| Кетон C ₆ | 316 | 1,7 | 49 | 1 | нет |
| SF ₆ | 146 | 1 | -63 | 23,500 | нет |



Рис. 8. Газонаполненные КРУ различного исполнения на напряжение 170 кВ и 24 кВ с использованием высокопрочного газа на основе смеси кетонов

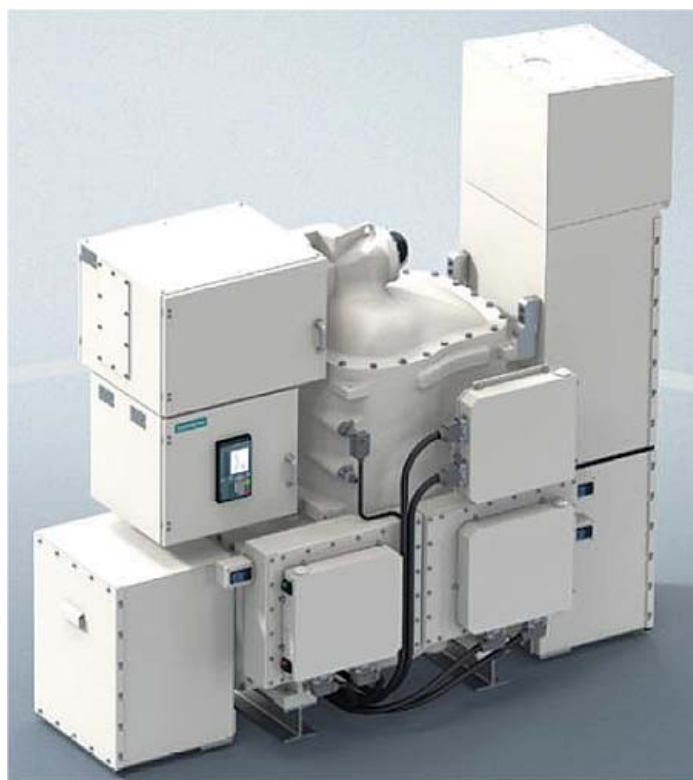


Рис. 9. Газонаполненная ячейка КРУ на напряжение 66 кВ с изоляцией техническим сухим воздухом [4]

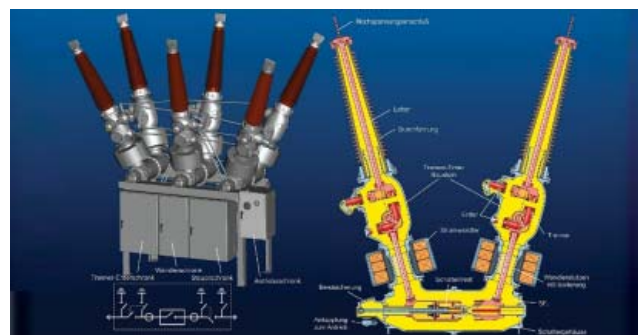


Рис. 10. Гибридные коммутационные аппараты на 145 кВ и РУ-420 кВ на базе гибридных аппаратов

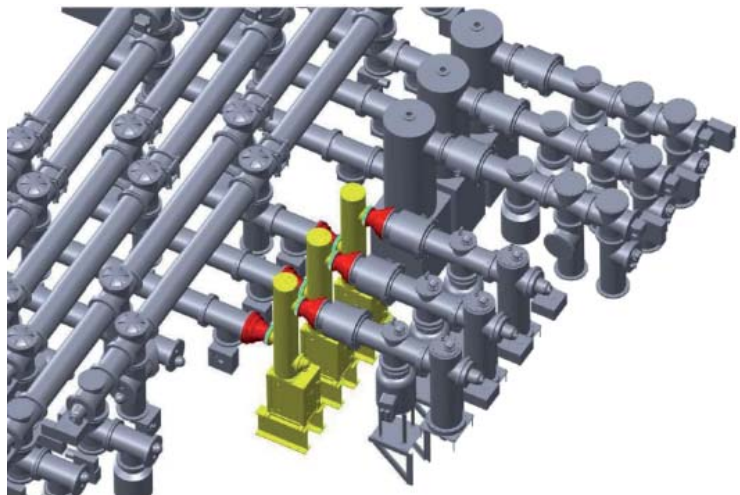


Рис. 11. Сопоставление первых и последних поколений ячеек КРУЭ [5] и отдельных выключателей [6]

параты и переход к модульному построению РУ. В каждом из гибридных аппаратов практически имеется несколько устройств (рисунок 10).

Гибридные аппараты реализуют новое качество в построении распределительных устройств и подстанций, где число используемых в проектировании ПС элементов сокращено в несколько раз, каждый аппарат является производственным модулем и имеет высокую надежность (так как собирается и испытывается на заводе, а все основные контактные соединения и механизмы находятся в герметизированных корпусах и не подвержены воздействию атмосферы), электрическая схема подстанции и ее компоновка упрощены и оптимизированы.

Гибридные аппараты реализуют новое качество в построении распределительных устройств и подстанций, где число используемых в проектировании ПС элементов сокращено в несколько раз, каждый аппарат — производственный модуль имеет высокую надежность (так как собирается и испытывается на заводе, а все основные контактные соединения и механизмы находятся в герметизированных корпусах и не подвержены воздействию атмосферы), электрическая схема подстанции и ее компоновка упрощены и оптимизированы.

В распределительных устройствах на основе гибридных аппаратов сочетаются преимущества

КРУЭ (компактность и высокая надежность) с главным преимуществом ОРУ — экономичностью (поскольку объем элегаза по сравнению с КРУЭ в гибридных подстанциях сокращается на 30–50%).

Применение вместо традиционных индуктивных трансформаторов тока и напряжения измерителей типа пояса Роговского и оптоэлектронных устройств также позволяет существенно снизить габариты даже таких компактных устройств как КРУЭ [9].

Примеры возможности уменьшения размеров КРУ за счет оптимизации конструкции отдельных высоковольтных устройств и общей их компоновки представлены на рисунке 11.

Из рисунка 11 видно, как выглядят выключатели последнего поколения (на рисунке — желтые) по сравнению с традиционными выключателями в распределительном устройстве при реконструкции РУ, и очевидно, что объем ячеек в процессе развития КРУЭ сократился в 2–3 раза.

Вопрос снижения затрат на монтаж, обслуживание и оптимизацию технико-экономических характеристик рассмотрен в [10] применительно к подстанциям глубокого ввода по материалам зарубежных данных.

Как следует из представленных в [10] данных, максимальными являются начальные капиталовложения в случае подстанций с КРУЭ, а наиболее низки — у ОРУ и гибридных под-

станций (прежде всего за счет значительного сокращения земли, упрощения монтажа и отказа от элегазовых сборных шин). С другой стороны, наиболее велики затраты на монтаж и обслуживание именно у подстанций с ОРУ, а наиболее малы — у подстанций с КРУЭ.

Если учитывать все затраты (начальные капиталовложения, затраты на монтаж, обслуживание, ремонты и эксплуатацию), то экономически целесообразным является строительство гибридных модульных распределительных устройств.


ВЫВОДЫ

1. В последние годы изменились требования к подстанционному оборудованию, прежде всего, в части социальных аспектов установки и эксплуатации подстанций, а также возможности загрязнения окружающей среды.
2. Ключевыми направлениями повышения надежности высоковольтного оборудования РУ являются: снижение отрицательного эффекта на оборудование от воздействия внешней среды и использование новых, более эффективных, изоляционных и механических систем.
3. Повышение управляемости распределительных устройств высоковольтных подстанций основано на применении «smart» оборудования и систем.
4. Повышение компактности распределительных устройств

главным образом достигается за счет применения новых изоляционных сред (в первую очередь, высокопрочных в электрическом отношении газов и полимерных диэлектриков), создания гибридных многофункциональных аппаратов и перехода к модульному построению распределительных устройств, использования нетрадиционных измерителей тока и напряжения, оптимизации конструкции отдельных высоковольтных устройств.

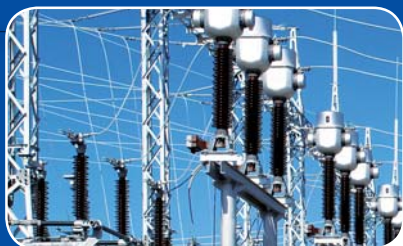
5. Наблюдается интенсивное развитие газонаполненных распределительных устройств и КРУ с твердой экранированной изоляцией на основе новых высокопрочных газов и усовершенствованных систем твердой изоляции.

6. Наиболее перспективными для применения в высоковольтной аппаратуре (как альтернатива элегазу) в настоящее время являются различные смеси флюоронитриловых газов или кетонов.

7. Важным направлением создания более компактных и эффективных распределительных устройств являются гибридные многофункциональные высоковольтные аппараты и переход к модульному построению РУ. Такие устройства близки к оптимальным в аспекте технико-экономических характеристик, учитывающих начальные капиталовложения, монтаж, эксплуатацию, ремонт и обслуживание. 

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Imura H., Kobayashi T., Mametani Y., Sasamori K., Okota T., Okada A. Changes in requirements for substation equipment and examples of new technologies applied to existing facilities, Report B-312, CIGRE, Paris, 2012.
2. Gautschi D., Ficheux A., Walter M., Vuachet J. Application of a fluoronitrile gas in GIS and GIL as an environmental friendly alternative to SF₆, Report B3-106, CIGRE, Paris, 2016.
3. Diggelmann T., Tehlar D., Mueller P. 170 kV pilot installation with a ketone based insulation gas with first experience from operation in the grid, Report B3-105, CIGRE, Paris, 2016.
4. Presser N., Orth C., Lutz B., Kuschel M., Teichmann J. Advanced insulation and switching concepts for next generation High Voltage Substations, Report B3-108, CIGRE, Paris 2016.
5. Gorenc D., Flegar K., Marenic V., Loncar M. Basic features of new 145 kV metal-enclosed, SF₆ gas-insulated switchgear, Report B3-109, CIGRE, Paris, 2016.
6. Lagartinho R., Pham P., Grillet M., Lyons L. Life extension program for Gas Insulated Substations, Report B3-311, CIGRE, Paris, 2016. Circuit breaker retrofitting: "Le Havre Project".
7. Silvant S., Gaudart G., Huguenot P., Kieffel Y., Perret M., Robin-Jouan Ph., Vigouroux D., Fray R., Cressault Y., Teulet Ph., Trepanier JY. Detailed analysis of live tanks and GIS circuit breakers using a new environmental friendly gas, Report A3-114, CIGRE, Paris, 2016.
8. Pohlink K., Kieffel Y., Owens J., Meyer F., Biquez F., Ponchon Ph., Van San R. Characteristics of fluoronitrile / CO₂ mixtures an alternative to SF₆, Report D1-204, CIGRE, Paris, 2016.
9. Kojovic Lj.A. Non-Conventional Instrument Transformers for Improved Substation Design, Report B3-101, CIGRE, Paris, 2016.
10. Вариводов В.Н. Развитие современных подстанций электрической сети сверхвысокого напряжения промышленной частоты // Энергоэксперт, 2010, № 1. Varivodov V.N. Development of modern electrical grid substations of ultrahigh frequency industrial voltage // Energyexpert, 2010, #1.



Издательство журнала «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение» выпустило книгу академика РАЕН, профессора Владимира Абрамовича Непомнящего

«НАДЕЖНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ»

В монографии исследована надежность оборудования электростанций и электрических сетей напряжением 1150–10(6) кВ, разработана методика сбора и статистической обработки информации о надежности оборудования. На основе статистических данных и расчетов определены основные параметры надежности и динамика их изменения в процессе эксплуатации. Выявлены статистические законы распределения отказов и времени восстановления элементов энергосистем. Проведено их сравнение с зарубежными данными.

Тираж книги 5000 экз.,
объем 196 с., формат 170x235 мм.
Для приобретения издания
необходимо позвонить по
многоканальному телефону
+7 (495) 645-12-41 или написать
по e-mail: info@eepr.ru