ИНТЕГРАЦИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

АВТОР:

Ю.Г. КРАМСКОЙ,
НП ПО РАЗВИТИЮ ВИЭ
«ЕВРОСОЛАР РУССКАЯ
СЕКЦИЯ»,
ООО «СОЛАР СИСТЕМС»

Объемы энергии из возобновляемых источников и существующие технологии уже сегодня позволяют полностью обеспечить человечество необходимой энергией. К сожалению, не все возможные технологии экономически выгодны сегодня. В России экономический потенциал ВИЭ составляет около 25%. Иными словами, до четверти всей необходимой энергии мы могли бы получать из возобновляемых источников экономически доступными способами.

Ключевые слова: силовая электроника; возобновляемые источники энергии (ВИЭ); СЭС; ВЭС; инвертор; реверсивный и гибридный преобразователи; MPPT-контроллер; частотный преобразователь; РГ; АСМ; накопитель энергии; СНЭ; V2G; «умные сети».

Современная гибридная установка распределенной генерации на основе солнечных панелей и ветротурбин

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы характер глобального мирового тренда приобрело использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в том числе солнечных (СЭС) и ветряных (ВЭС) электростанций и установок (ВЭУ) различного масштаба, относимых к объектам распределенной генерации (РГ; DG) и объединяющихся совместно с накопителями энергии и зарядными станциями для электромобилей под общей концепцией «Распределенных источников энергии» (DER). В большинстве стран развитие данного направления обеспечивается за счет повышенной платы за электроэнергию (feed-in tariff — «зеленый» тариф), обеспечивающей окупаемость проектов и возврат вложенных инвестиций. В 2015 г. мировая «зеленая» энергетика впервые в истории показала более быстрый рост, чем традиционная, были построены более 63 ГВт ВЭС и 50 ГВт СЭС, их общая установленная мощность достигла 433 и 227 ГВт соответственно (рис. 1 и 2), из которых 144 и 45 — в Китае [1]. В наиболее передовых странах ВИЭ уже обеспечивают существенную долю выработки — в Дании ВЭС покрывают 42% годового потребления энергии, в Германии ВЭС и СЭС — более 40%, а в отдельные солнечные и ветреные дни ВИЭ полностью перекрывают потребности этих стран, в результате чего на рынке электроэнергии периодически складываются отрицательные цены. По итогам 2016 г., несмотря на 30%-е снижение инвестиций в проекты, в мире построены рекордные 70 ГВт солнечных станций [2]. По прогнозу МЭА, к 2030 г. «зеленая» энергетика будет составлять более 42% в мировой структуре производства энергии.

Россия, хотя и с некоторым запозданием, также не осталась в стороне от данного глобального тренда: в 2013 г. дан старт масштабному строительству электростанций мощностью свыше 5 МВт, функционирующих на основе ВИЭ (ВЭС, СЭС на основе фотоэлектрических панелей/модулей (ФЭМ) и малых ГЭС), в рамках договоров поставки мощности на оптовый рынок электроэнергии (ДПМ ВИЭ), а с 2015 г. государственная поддержка расширена на розничный рынок (РРЭ), в том числе на сетевые генерирующие объекты (ГО) мощностью менее 5 МВт (с целью покрытия 5% потерь в распределительных сетях) и на установки ВИЭ в изолированных энергорайонах. Запланированные в РФ суммарные объемы строительства до 2024 г. — 3,6 ГВт ВЭС и 1,5 ГВт СЭС, из которых уже введены в эксплуатацию несколько промышленных ВЭС и более десятка

МИРОВАЯ УСТАНОВЛЕННАЯ МОЩНОСТЬ СЭС И ВЭС [1]

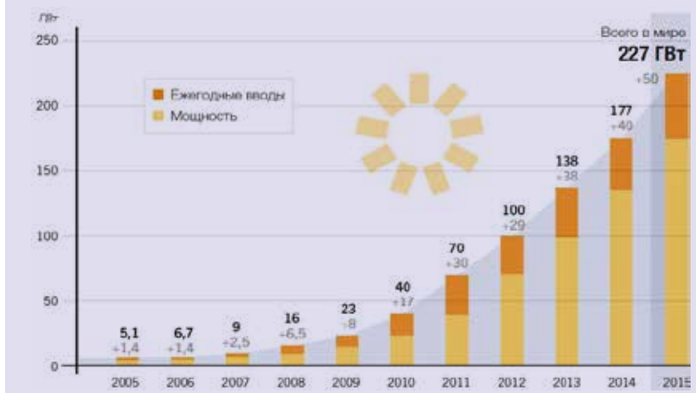


Рис. 1

ЕЖЕГОДНЫЕ ВВОДЫ МОЩНОСТИ СЭС И ВЭС [1]

Рис. 2

СЭС (от 100 кВт до 25 МВт) общей мощностью более 3 и 70 МВт соответственно, десятки объектов ВИЭ находятся на разных стадиях проектирования и строительства. Одни из первых в РФ промышленных СЭС показаны на рис. 3 и 4. Одно из основных требований к указанным проектам в РФ — обеспечение локализации производства компонентов, оборудования и материалов на территории страны. При этом целью правительства РФ при введении мер государственной поддержки ВИЭ является не собственно строительство объектов «зеленой» генерации (особенно в условиях значительного избытка классических мощностей в стране), а создание механизма развития новых отраслей промышленного производства, в том числе с экспортным потенциалом. Существенный вклад в степень локализации проектов ВИЭ на данный момент может обеспечить промышленная сборка и приемо-сдаточные испытания преобразовательного оборудования на основе силовой электроники, являющегося ключевым элементом современных ВЭС III и IV типов и фотовольтаических СЭС (PV SPP), который обеспечивает связь между источниками энергии со специфичными характеристиками и стандартными электрическими сетями или нагрузкой, согласование параметров, управление генерацией и интеграцию таких объектов в энергосистему. В свете ожидаемого углубления требований к локализации перед российской наукой и промышленностью стоит задача разработки и освоения серийного производства всего спектра преобразовательного оборудования для ВИЭ. Дополнительным направлением внедрения силовой электроники в энергетику на основе DER является использование систем накопления энергии (СНЭ, ESS), в том числе для непосредственной интеграции их в электросети или в составе зарядных станций для электромобилей с поддержкой реверсивной передачи энергии (технология V2G), а также для автономных ВИЭ.

Рис. 3
Солнечная электростанция «Перово» общей мощностью 105,56 МВт, расположенная возле села Ключи Перовского сельского совета в Крыму

Рис. 4
Сотрудник на Абаканской солнечной электростанции в Республике Хакасия

При разработке и производстве преобразовательного оборудования на основе силовой электроники, проектировании объектов РГ и схем выдачи их мощности, строительстве и эксплуатации электростанций, функционирующих на основе ВИЭ, необходимо учитывать существующие общие требования к объектам генерации и международные нормы и правила, учитывающие специфику функционирования DER в энергосистемах.

ТИПЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ЧАСТИ СЭС И ВЭС

В зависимости от типа и масштаба проекта РГ их преобразовательные части подразделяются на:

- автономные (off-grid) установки (инверторы) мощностью до сотен киловатт, питающие одно- или трехфазную нагрузку на удаленных объектах или изолированных энергорайонах при отсутствии внешних электросетей, включающие один из видов ВИЭ и накопитель (АКБ);
- сетевые (grid-tie) установки от единиц киловатт и электростанции до сотен мегаватт, функционирующие на основе ВИЭ и обеспечивающие синхронную выдачу мощности в распределительные электросети, согласование и управление параметрами режима, интеграцию генерирующих объектов ВИЭ и их систем контроля, защиты и управления в энергосистему;
- гибридные установки, сочетающие возможности первых двух типов и обеспечивающие параллельную работу нескольких разнотипных источников соизмеримой мощности (СЭС, ВЭС, микро-ГЭС, дизель-генераторы и СНЭ).

Для применения на удаленных объектах или в изолированных энергорайонах наибольший интерес представляют автономные гибридные установки (АГУ, microgrid), включающие в том числе ФЭМ, ВЭУ и резервные дизель-генераторы, обеспечивающие совместно надежное круглосуточное электроснабжение потребителей, минимальный расход топлива (экономия до 90% по сравнению с обычными ДГУ) и эффективное использование ресурса аккумуляторов (циклы заряд/разряд) и дизель-генераторных установок (ДГУ, мото-часы). Крупнейшая в мире АГУ запущена в октябре 2016 г. в высокогорном районе Тибета, в ее состав входит СЭС мощностью 13 МВт и накопитель энергии (ESS) емкостью 7 МВт·ч.

Основным элементом СЭС любого масштаба являются ФЭМ, изготавливаемые преимущественно по кремниевой мульти-/монокристаллической или тонкопленочной технологиям и являющиеся источниками тока, пропорционального инсоляции, имеющие единичную мощность 125–340 Вт, нормированную при стандартных условиях и инсоляции 1000 Вт/м^2. В составе фотоэлектрических энергоустановок они собираются в последовательные цепочки (стринги) с максимальным напряжением DC 24–250 В (бытовые установки) или 600/1000/1500 В (промышленные), которые подключаются ко входу MPPT-контроллера, при необходимости параллельно по несколько стрингов. Количество ФЭМ в цепочке ограничено суммарным напряжением холостого хода (ХХ) в условиях сочетания максимальной мгновенной инсоляции и минимальных температур в районе размещения СЭС с учетом свойственных ФЭМ отрицательных температурных коэффициентов (в среднем –0,45%/ °С по мощности и –0,35%/ °С по напряжению ХХ). Типичная вольт-амперная характеристика и зависимость мощности монокристаллического ФЭМ от инсоляции приведена на рис. 5.

Автономные ВЭС и СЭС включают:

- источник энергии — ветрогенератор или группу солнечных панелей малой мощности;
- MPPT-контроллер (DC-DC-преобразователь), управляющий режимом работы источника для отбора его мощности в точке максимума (Max-Power-Point-Tracking, MPPT), обеспечивающий нормированное выходное напряжение;
- согласующее зарядное устройство для АКБ с напряжением DC 12/24/48 В (бытовые и малые коммерческие установки) или 96 В и выше (промышленные установки);
- группу последовательно-параллельно соединенных АКБ требуемого напряжения и емкости;
- автономный инвертор, преобразующий напряжение АКБ вместе со встроенным (развязывающим) трансформатором до стандартного уровня для питания нагрузки переменного тока [3].

Современные СЭС промышленного масштаба на основе сетевых инверторов состоят из повторяющихся конструктивных элементов-модулей, размещаемых на земле или на крышах зданий (roof-top), в том числе:

- однотипных опорных конструкций для ФЭМ («столов»), фиксированных под оптимальным углом наклона или оснащенных поворотными следящими системами (1- или 2-осевые трекеры);
- рядов ФЭМ, расположенных на столах и подключенных последовательно в цепочки (стринги);
- сумматоров (объединительных шкафов), соединенных кабель-

ТИПИЧНАЯ ВАХ И ЗАВИСИМОСТЬ МОЩНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФЭМ ОТ ИНСОЛЯЦИИ

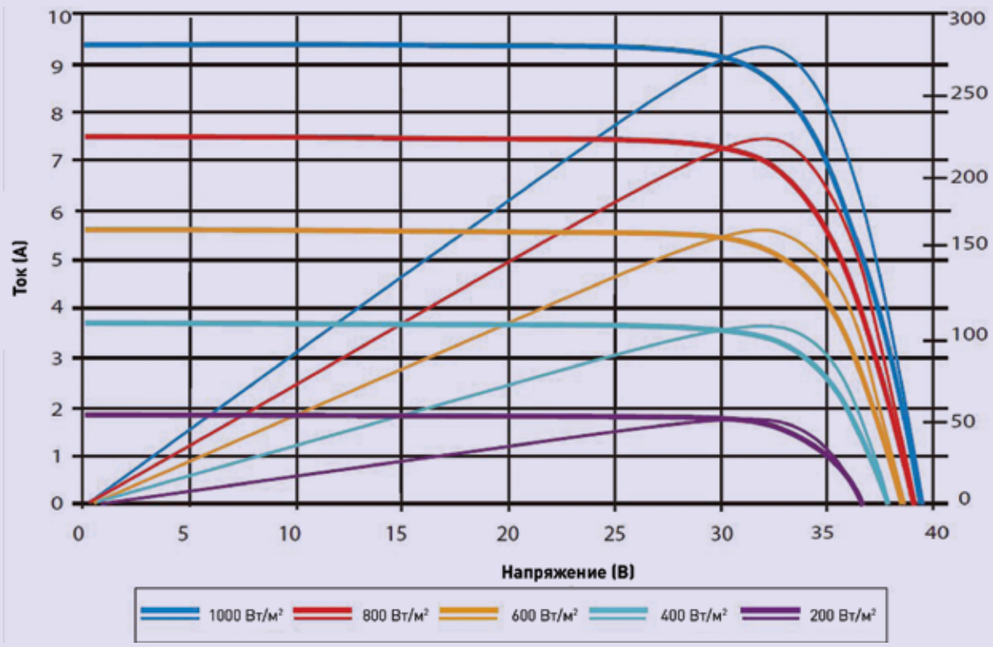


Рис. 5

ной системой постоянного тока (600–1500 В) с цепочками ФЭМ и далее с трехфазными сетевыми инверторами, подключаемыми на выходе к силовым трансформаторам, повышающим выходное напряжение до стандартного уровня (до 40 кВ).

Сетевые инверторы являются ведомыми, осуществляющими подстройку под внешнее опорное напряжение по уровню, частоте и фазе, автоматически синхронизирующимися с промышленной сетью. Типовые схемы СЭС включают группы блочно-модульных инверторных установок (БМИУ) мощностью 500–5000 кВА, обеспечивающих выдачу в электросети энергии

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АВТОНОМНОЙ СЭС

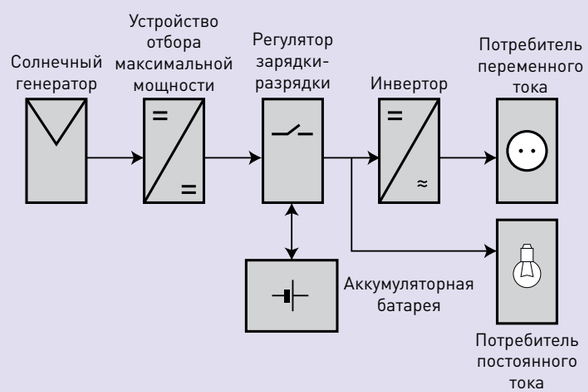


Рис. 6

от больших массивов ФЭМ (до сотен мегаватт), согласование и управление параметрами режима, интеграцию генерирующих объектов и их систем контроля, защиты и управления в энергосистему.

При строительстве промышленных СЭС в последние годы в мире наблюдаются две противоположные тенденции:

- укрупнение единичной мощности центральных инверторов (до 1,5–2,5 МВт) и БМИУ на их основе (до 5 МВт в одном 40-футовом контейнере, включая специфичный многообмоточный повышающий трансформатор, коммутационные аппараты и комплект вторичных систем);
- все более широкое применение распределенной модульной схемы СЭС на основе малогабаритных «стринговых» инверторов (единичной мощностью до 40–60 кВт) вместо центральных (и даже индивидуальных микроинверторов на каждый ФЭМ), позволяющих легко наращивать мощность БМИУ параллельным или шлейфовым соединением выходных цепей инверторов, подключаемых к типовым КТП 0,4/6–35 кВ (рис. 9 и 10).

Преимуществами использования распределенной модульной схемы СЭС на стринговых инверторах являются:

ПРЕИМУЩЕСТВО КОНТРОЛЛЕРА С MPPT ПО СРАВНЕНИЮ С PWM (ШИМ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ)

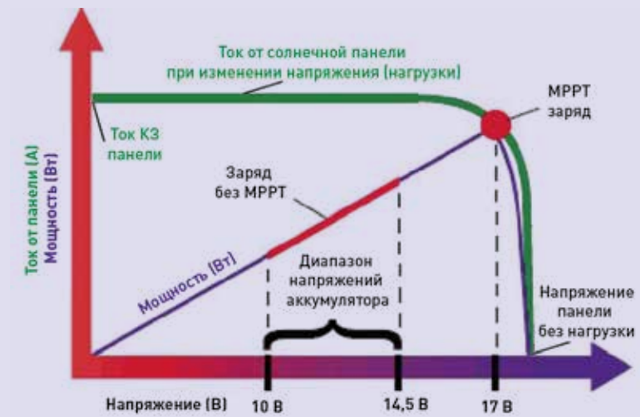


Рис. 8

СХЕМА СОЛНЕЧНОГО ИНВЕРТОРА (1 ФАЗА) С ИНТЕГРИРОВАННЫМ MPPT-КОНТРОЛЛЕРОМ

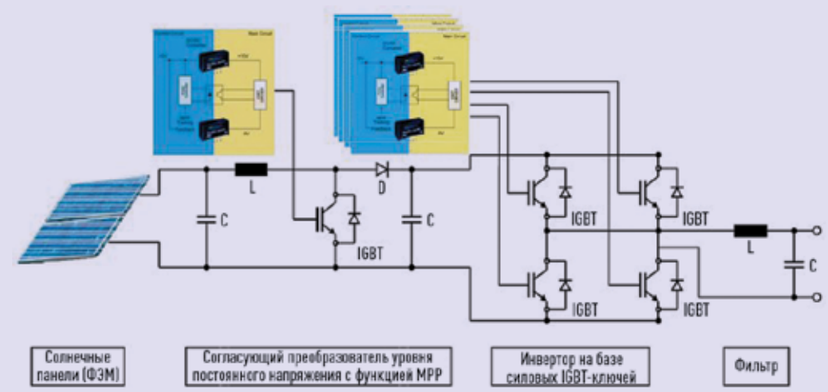


Рис. 7

ОБЪЕДИНЕНИЕ СТРИНГОВЫХ ИНВЕРТОРОВ В ГРУППЫ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ИЛИ ШЛЕЙФОВЫМ ПОДКЛЮЧЕНИЕМ 3-ФАЗНЫХ ВЫХОДНЫХ ЦЕПЕЙ ЧЕРЕЗ СТАНДАРТНЫЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЙ ШКАФ С НАПРЯЖЕНИЕМ 380–690 В

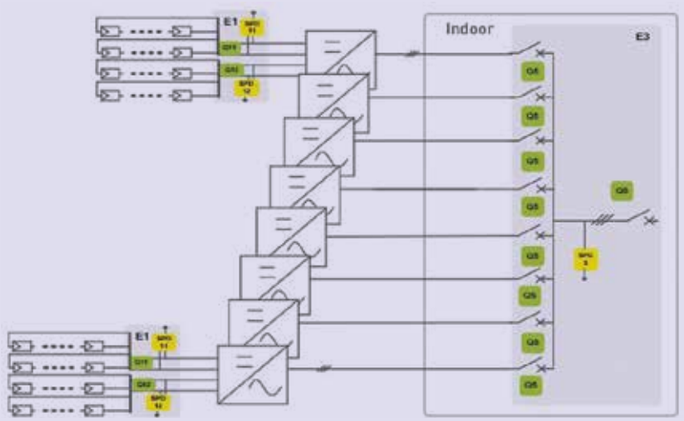


Рис. 9

- универсальные компактные инверторы, быстро монтируемые как непосредственно на столах с ФЭМ (вместо сумматоров), так и на стенах/крышах, что позволяет применять их в проектах любого типа и масштаба;
- легкое масштабирование мощности СЭС от десятков киловатт до сотен мегаватт, не требующее больших затрат и позволяющее использовать типовые КТП со стандартными двухобмоточными силовыми трансформаторами;
- надежная распределенная схема с большим количеством MPPT-входов, подключаемых непосредственно к цепочкам, что повышает эффективность отдачи энергии ФЭМ и сокращает потери, увеличивая общую выработку энергии на 3–5% по СЭС в целом по сравнению с центральными инверторами;
- при повышенной относительной стоимости (на 1 кВт) таких инверторов по отношению к центральным общий CAPEX на строительство СЭС сопоставим в обоих вариантах, однако OPEX и итоговая стоимость энергии за период эксплуатации станции (LCOE) ниже для варианта на стринговых инверторах.

На рис. 11 приведена крупнейшая в мире наземная СЭС мощностью 1000 МВт (Yanchi, Китай), введенная в эксплуатацию в июне 2016 г. Она занимает более 2000 га и построена по распределенной модульной схеме на основе 30.000 стринговых смарт-инверторов мощностью 33 кВт, каждый из которых включает 3 MPPT-контроллера.

ТИПЫ СЕТЕВЫХ ВЕТРЯНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В ветроустановках малой и средней мощности применяются обычные генераторы постоянного или переменного тока, в том числе с фазным или короткозамкнутым (КЗ) ротором или постоянными магнитами, которые обычно подключаются к АКБ и инвертору через простой выпрямитель или MPPT-контроллер.

Практически все современные и вновь строящиеся ВЭС с использованием ветротурбин мегаваттного класса (рис. 12), имеющие высокую эффективность и производительность ветряных турбин при широком диапазоне скоростей ветра, реализуются на основе асинхронных машин двойного питания (DFIG, или АСГ, тип III) с реверсивным преобразователем с применением IGBT-транзисторов в цепи ротора (рис. 13) или синхронных машин с полномасштабным инвертором в цепи статора (тип IV). Эти два типа турбин допускают быстрое и независимое управление активной и реактивной мощностью, могут ограничивать токи КЗ и сохранять работоспособность при глубоких просадках напряжения в сети (алгоритм LVRT). Кроме того, схемы с преобразователями позволяют оптимизировать и согласовать режимы работы механической и электрической частей турбины, скорость ветра, моменты сил и нагрузку/поворот лопастей, обеспечивая максимальную отдачу ВЭУ в точке MPPT. Необходимо отметить, что одним из первых в мире работы по созданию и практическому применению асинхронизированных машин (АСМ) в электроэнерге-

ФРАГМЕНТ ПЕРСПЕКТИВНОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СХЕМЫ СЭС НА ОСНОВЕ ГРУПП СТРИНГОВЫХ ИНВЕРТОРОВ, ОБЪЕДИНЕННЫХ В БМИУ С ТИПОВЫМИ КТП-10 КВ И ШЛЕЙФОВЫМ ПОДКЛЮЧЕНИЕМ К ШИНАМ ПС-110 КВ

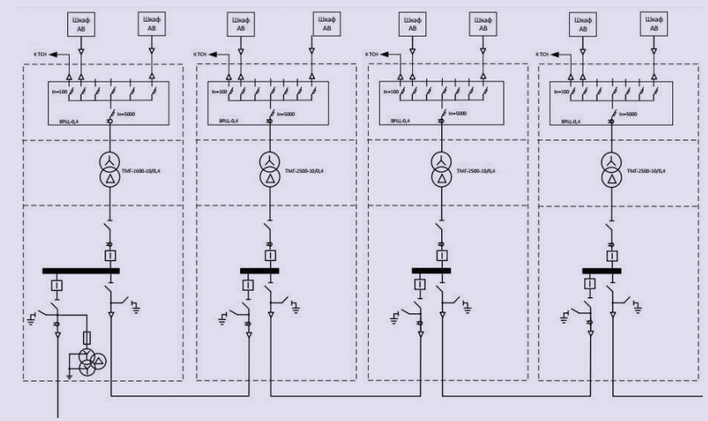


Рис. 10

тике в 1950-х гг. в СССР развернул коллектив, созданный по инициативе и под научным руководством М.М. Ботвинника [5].

На сегодняшний день АСМ находят применение в качестве гидрогенераторов, компенсаторов с маховиком и особенно широко используются в мощных ветрогенераторах (в исполнении с трехфазным шихтованным ротором), что обусловлено рядом уникальных свойств АСМ [6]:

- обладают способностью функционировать в широком диапазоне изменений частоты вращения ротора (ветроколеса);
- векторный принцип регулирования возбуждения позволяет раздельно и независимо друг от друга регулировать активную и реактивную мощность, что делает статическую устойчивость АСМ независимой от параметров режима;
- АСКМ (компенсаторы с маховиком) улучшают устойчивость энергосистемы, повышают надежность и пропускную способность ЛЭП, стабилизируя напряжение по величине и фазе (эффект «жестких шин»);
- при установке на промежуточных подстанциях (ПС) длинных магистральных линий обеспечивается секционирование передачи, локализация и демпфирование аварийных возмущений;
- при установке на ПС потребителей с резкопеременной нагрузкой АСКМ позволяют стабилизировать уровень напряжения и поглощать колебания активной нагрузки. Аналогичных эффектов можно достичь и с при-

Рис. 11
Крупнейшая в мире наземная СЭС мощностью 1000 МВт построена по распределенной схеме на основе стринговых смарт-инверторов

менением асинхронизированных ветрогенераторов мегаваттного класса, обладающих значительной инерционностью, особенно при существенной для энергосистемы суммарной мощности АСГ ВЭУ (100–150 МВА).

Наличие компенсационного AC/DC/AC преобразователя в цепи симметричного двух- или трехфазного ротора ВЭУ III типа обеспечивает автоматическое управление выходной мощностью в соответствии с графиком максимальной эффективности отбора, максимальное использование энергии ветра, позволяет сократить потери в цепи ротора, эффективно используя мощность скольжения и одновременно понижая механические нагрузки.

Для ВЭУ максимальная мощность отдачи ветроколеса (в точках MPPT) является функцией куба скорости ветра, а характеристика крутящего момента — квадрата скорости вращения (рис. 14). Контроллер регулирует частоту и направление вращения вектора токов возбуждения ротора, обычно в пределах скольжения от –30 — –50% (подсинхронная скорость) и до +30 — +50% (сверхсинхронная скорость), при этом конвертер обычно имеет мощность 30% (до 50%) от номинальной выходной мощности статора ВЭУ, что является экономически оправданным компромиссом. При этом для определения установленной мощности всей ВЭУ на основе АСГ III типа необходимо учитывать (кроме параметров лопастей/ветроколеса и механической части ветроустановки) возможность долговременной выдачи активной мощности с ротора, вращающегося со сверхсинхронной скоростью, через реверсивный преобразователь в сеть и ее суммирование с мощностью, снимаемой непосредственно со статора (с учетом реактивной составляющей в выходных токах преобразователя и значительной емкости конденсаторов в звене постоянного тока).

Реализация преобразовательной части ВЭУ IV типа (рис. 15) во многом аналогична схемам на основе центральных инверторов мегаваттного класса для СЭС. ВЭУ IV типа с изменяемой в широких пределах скоростью вращения турбины (с прямым приводом или мультипликатором) и автоматическим полномасштабным преобразователем в цепи статора обеспечивают полностью независимые скорость механического вращения и выходную частоту сети. Такой генератор может работать на любых переменных частотах и в аварийных ситуациях, оставаясь связанным с сетью, но изолированным от аварийных режимов преобразователем, система регулирования которого ограничивает выходной ток статора в допустимых пределах — обычно в диапазоне 1,1–1,5 о.е. (среднеквадратичное значение). Такие ветротурбины выполняются многополюсными или на постоянных магнитах, что позволяет эксплуатировать их на малых скоростях без применения механической коробки передач (мультипликатор), упрощая схемы управления и увеличивая надежность (по сравнению с турбинами DFIG), но вследствие относительно высокой стоимости они преимущественно используются

Рис. 12
Современные ветротурбины

СХЕМА ВЭУ III ТИПА (DFIG) С РЕВЕРСИВНЫМ AC-AC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ В ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО РОТОРА

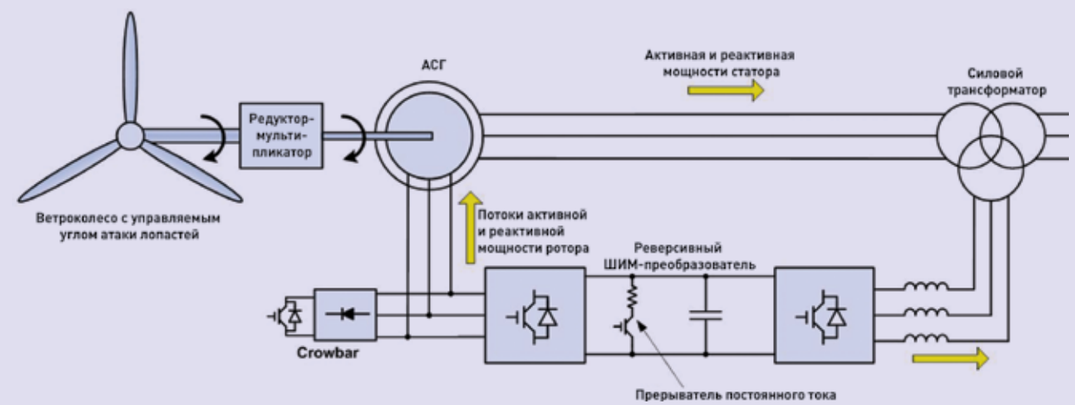


Рис. 13

в морских ВЭС (off-shore) [13]. В последнее время при строительстве наземных ВЭС также наблюдается тенденция перехода на ветротурбины IV типа мощностью свыше 3 МВт (на постоянных магнитах и без мультипликатора).

Типичные конфигурации ВЭС и СЭС мультимегаваттного масштаба включают:

- группу однотипных ветротурбин или массив солнечных ФЭМ мощностью 500–5000 кВт (офшорные до 10 МВт);
- энергоблоки (или БМИУ), агрегирующие каждый ветрогенератор (типовое выходное напряжение 480–690 В) или массив солнечных модулей (270–690 В) с силовым трансформатором, повышающим напряжение до уровня СН (10–40 кВ);
- внутристанционную (коллекторную) кабельную сеть среднего напряжения, связывающую несколько блоков с существующей повышающей подстанцией

ХАРАКТЕРНЫЙ ГРАФИК ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ ВЭУ ОТ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ВЕТРА С ТОЧКАМИ MPPT

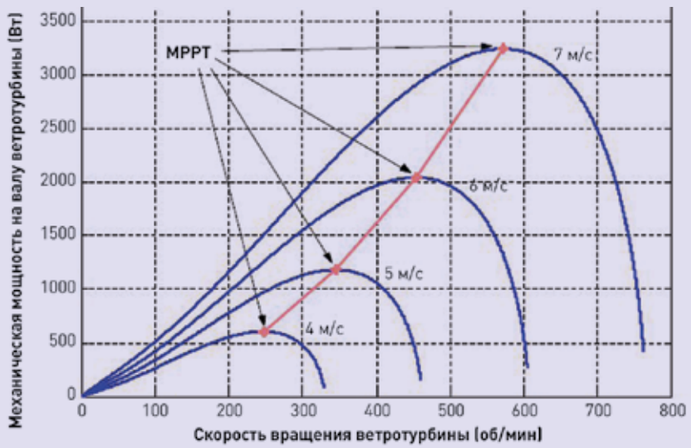


Рис. 14

СХЕМА ВЭУ IV ТИПА С ПРЯМЫМ ПРИВОДОМ, СИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ (PMSG) И ПОЛНОМАСШТАБНЫМ КОНВЕРТОРОМ (PWM) В ЦЕПИ СТАТОРА

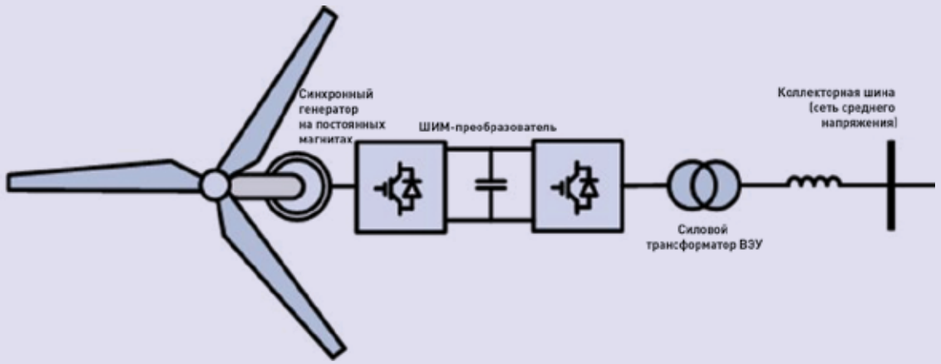


Рис. 15

110–220 кВ или вновь строящейся в рамках схемы выдачи мощности (СВМ) станции (от 20 МВт) с преимущественно шлейфовым соединением блоков (рис. 16);
– комплекс вторичных систем контроля (включая метеостанции), защиты и управления (локально или дистанционно из диспетчерского центра), систему учета электроэнергии и контроля ее качества, а также систему прогнозирования генерации и состояния оборудования.

ТРЕБОВАНИЯ К ГО ВИЭ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ С ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

В нормативной базе различных стран, касающейся присоединения объектов РГ к энергосистемам (сетевые кодексы — grid code), основными вопросами являются: поддержание напряжения на шинах станций; требования к устойчивости в переходных процессах, вызванных короткими замыканиями; регулирование активной мощности; требования к качеству электроэнергии. Также сформулированы требования в части влияния ВЭС и СЭС на устойчивость и надежность функционирования ЭЭС, на качество регулирования параметров электрического режима в точке их подключения, на уровень токов короткого замыкания, в том числе требования к основному оборудованию и системам регулирования ВЭС и СЭС в части их параллельной работы с энергосистемой [4].

С точки зрения подключения к электросетям в России, СЭС и ВЭС рассматриваются как объекты РГ, к которым предъявляется большая часть типовых требований к электростанциям, в первую очередь таких нормативно правовых актов как: ПУЭ, ПТЭ электростанций и сетей, Постановление Правительства РФ от 27.12.2004 № 861 (включая Правила технологического присоединения к сетям), а также стандарты АО «СО ЕЭС», касающиеся субъектов ОДУ, и регламенты ОРЭМ, предъявляющих требования к параметрам силовой части ГО и вторичных систем защиты и управления (РЗА, ПА, АСУТП, СОТИ АССО, АИИС КУЭ). Работа РГ в составе энергосистемы предполагает участие ГО в режимном и противоаварийном управлении, в том числе в общем первичном регулировании частоты (ОПРЧ), регулировании напряжения и реактивной мощности, а также в обеспечении устойчивости синхронных машин (на смежных ТЭС) при нормативных возмущениях типа короткого замыкания, отключении электрических связей и т.п. [7, 8].

ВЭУ должны быть автоматизированы, в обязательный объем функционала систем автоматизации ВЭС входят [14]:

– ограничение частоты вращения ветроколеса на заданном уровне при высоких скоростях ветра;

КОЛЛЕКТОРНАЯ СЕТЬ ВЭС СО ШЛЕЙФОВЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ВЭУ НА УРОВНЕ СН

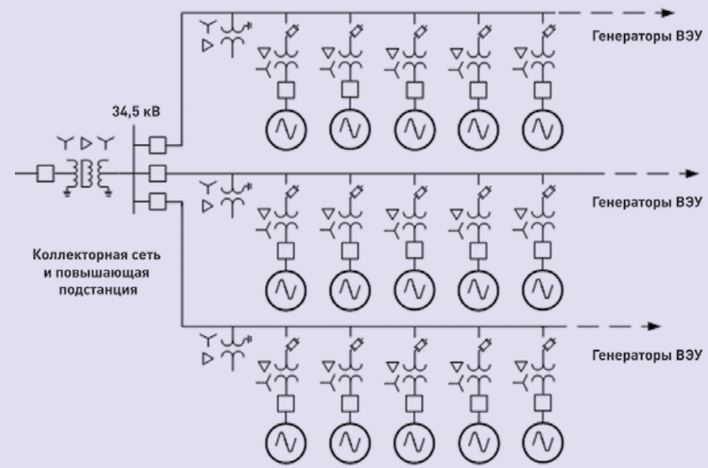


Рис. 16

ТОКИ КЗ НА ВЭУ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НАХОДЯТСЯ В ПРЕДЕЛАХ 1,1–2,5 НОМИНАЛА И ПРИВОДЯТ К ДОСТАТОЧНО СЛОЖНО РЕАЛИЗУЕМОЙ ПО УСЛОВИЯМ НАДЕЖНОСТИ И СЕЛЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЕ БЕЗ ВЕРОЯТНОСТИ ЛОЖНОГО СРАБАТЫВАНИЯ

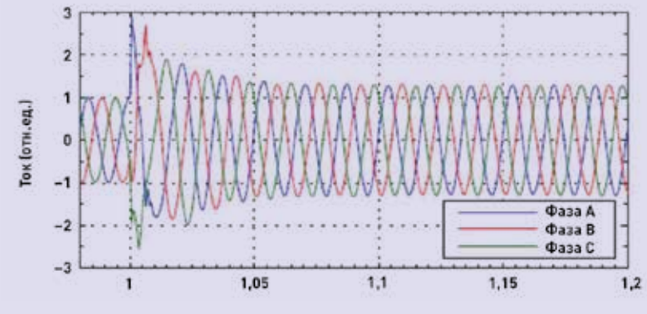


Рис. 17

– автоматическая ориентация ветроколеса по направлению ветра (при ветроагрегате с горизонтально-осевым ветродвигателем);
– защита электрических цепей ВЭУ от токов КЗ и перегрузок.

Все ВЭС, включая гибридные ВЭУ, работающие совместно с дизель-генераторами и источниками других типов, должны иметь дополнительной минимальный объем автоматизации:

– включение на параллельную работу при достижении минимальной рабочей скорости ветра при соблюдении ограничений по току включения;
– автоматическое отключение и останов ВЭУ при снижении скорости ветра ниже минимальной, выходе из строя токосъемного устройства или при предельно допустимом закручивании кабеля;
– возможность дистанционного управления ВЭУ мощностью выше 30 кВт;
– автоматический пуск в работу (страгивание и разгон до синхронной частоты вращения);
– автоматическое отключение и останов ВЭУ при скорости ветра выше максимальной рабочей скорости, а также при возникновении недопустимо высокого уровня вибраций основных частей ветроагрегата.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ГО ВИЭ

До начала проектирования необходимо с целью получения технических условий на технологическое присоединение к электросетям разработать предварительную СВМ

Рис. 18
Возгорание ветрогенератора

или раздел проекта с расчетом электроэнергетических режимов или внестадийно выполнить полноценную СВМ с учетом:

- назначения ГО, режима работы, схемы участия/неучастия на рынке электроэнергии;
- допустимой скорости набора и сброса нагрузки, наличия/отсутствия технологического минимума установки;
- максимальных мощностей в точках присоединения к сети.

При проектировании на основе полученных ТУ на ТП необходимо также учитывать особенности существующих сетей в районе предполагаемого размещения, наличие каналов связи, существующей РЗА, ПА, ССПИ/ТМ, ожидаемый КИУМ и степень локализации ГО ВИЭ.

При выборе релейной защиты внутренней сети СЭС или ВЭС необходимо учитывать особенности данного источника (ФЭМ, ветрогенератор) и преобразовательного оборудования (пример — рис. 17), а его связи с ПС следует рассматривать как линии с двусторонним питанием [9], вследствие чего при проектировании необходимы:

- сочетание направленных и ненаправленных токовых защит;
- координация уставок защит (или предохранителей) блочных повышающих трансформаторов и защиты смежных участков;
- организация дифференциальной защиты и МТЗ на трансформаторах повышающей подстанции;
- проработка возможности применения для РУ/шин среднего напряжения быстродействующей защиты.

При удаленных КЗ система автоматического управления (САУ)преобразователя ВЭУ выполняет функции, обеспечивающие поддержание напряжения на шинах. При более близких замыканиях в сети, сопровождающихся глубокими снижениями напряжения на шинах ветростанции, АСГ ВЭУ может быть переведен в различные режимы ограничения тока, в том числе с выдачей реактивной мощности взамен активной. Также в схемах управления током ротора ВЭУ III типа предусмотрены защитные устройства, срабатывание которых шунтирует преобразователь и превращает АСГ в обыкновенный асинхронный генератор.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ОБЪЕКТАМ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ

Для предотвращения и ликвидации технологических нарушений все ГО, находящиеся в зоне филиалов АО «СО ЕЭС», вне зависимости от рынка сбыта электроэнергии должны отрабатывать нарушения нормального режима (снижение или повышение частоты, напряжения, асинхронный ход, перегрузка сечений, ЛЭП и оборудования), а именно должны обеспечивать:

- возможность регулирования (снижения для ГО ВИЭ) активной мощности в широком диапазоне;
- поддержание качества вырабатываемой энергии;
- максимальное сохранение в работе объектов РГ при возникновении нарушений режимов во внешних электросетях;
- немедленное отключение от сети по команде Системного оператора.

Генерирующее оборудование СЭС и ВЭС (как и любых электростанций) должно обеспечивать участие в ОПРЧ, при этом с учетом отсутствия у них технологической возможности увеличить выработку электроэнергии по требованию (ввиду ограниченности входного «топливного» ресурса) должно быть обеспечено надежное функционирование ГО в следующих диапазонах частот (что частично коррелирует с требованиями к DER европейских стандартов BDEW и ENTSO-E):

- 47,5–51,5 Гц — длительная работа в регулировочном диапазоне;
- 47–47,5 Гц — не менее 30–40 с (до 1 мин.);
- 46–47 Гц — не менее 1 с (до 10 с);
- при превышении частоты свыше 50,2 Гц (до 51,5 и более) необходима плавная разгрузка по выходной активной мощности с градиентом — 40%/Гц (статизм первичного регулирования 4–6%).

Также должно быть обеспечено надежное функционирование ГО при снижении напряжения:

- длительная устойчивая работа объекта в диапазоне напряжений не менее +/–10% от номинального;
- устойчивая работа при кратковременных провалах напряжений (функция LVRT — Low Voltage Ride Through) (рис. 19).

В наиболее современных моделях оборудования объектов ВИЭ в САУ преобразовательной части может быть реализована функция FRT (fault ride through), позволяющая быстро реагировать в случае КЗ/аварий с просадкой напряжения в энергосистеме, при этом инвертор может продолжить выдавать необходимую реактивную мощность для подавления колебаний напряжения в энергосистеме (рис. 20).

СТАНДАРТЫ LVRT В РАЗНЫХ СТРАНАХ ПО НЕОБХОДИМОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ

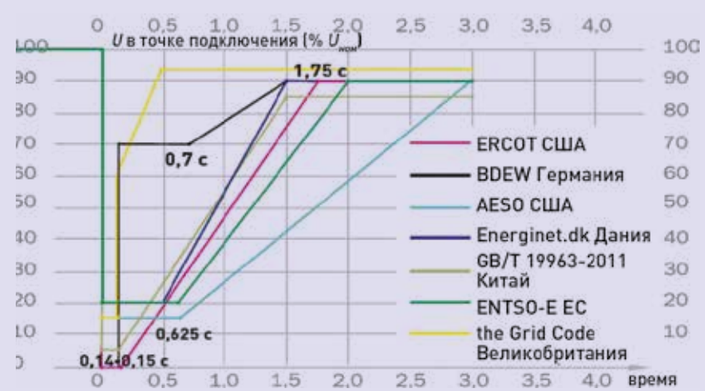


Рис. 19

Более подробно проблемы интеграции РГ (в том числе ВИЭ) в энергосистему рассмотрены в Материалах совместного заседания НТК НП «НТС ЕЭС» [9]. Кроме того, с целью обобщения международного опыта разработки и внедрения национальных сетевых кодексов, регламентирующих порядок включения РГ на параллельную работу с энергосистемой, и формирования отечественной нормативной базы в отношении ВИЭ по заданию Системного оператора в АО «НТЦ ЕЭС» на текущий момент завершается научно-исследовательская работа «Исследование и разработка технических требований к характеристикам силового оборудования и системам регулирования ветряных и солнечных электроэнергетических установок для их работы в составе энергосистемы, включая методы контроля испытаний и подтверждения соответствия».

ЛОКАЛИЗАЦИЯ В РФ ПРОИЗВОДСТВА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В рамках обеспечения требуемого уровня локализации в РФ производства оборудования и компонентов для проектов ВИЭ российскими предприятиями уже освоены крупноузловая сборка и испытания солнечных инверторных станций как мегаваттного класса («Шнайдер Электрик», АББ, «Гринмакс»), так и стринговых («Микроника-Лисис» и др.). Освоен выпуск модульных автономных и гибридных инверторов, МРРТ-контроллеров, ИБП, СНЭ и частотных преобразователей («МикроАрт», НТЦ «Приводная техника» и др.), заявлены планы по локализации и идет

освоение производства преобразовательной силовой электроники для ВЭС и СЭС различного масштаба (в том числе в рамках РРЭ) более чем десятком отечественных предприятий («Связь-инжиниринг», «Электронмаш» и др.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Внедрение генерирующих объектов ВИЭ с преобразовательной частью на основе силовой электроники позволяет производить «зеленую» энергию и одновременно обеспечивать гибкое управление режимами прилегающих сетей, повышение надежности энергосистем и качества электроснабжения потребителей.
2. При планировании размещения объектов генерации необходимо внимательно подходить к вопросам выбора площадки и параметров объекта РГ с учетом особенностей существующих схем, состояния оборудования и режимов прилегающих сетей, перспектив изменения нагрузок в энергорайоне и их профиля, которые должны быть отражены при разработке СВМ и ТУ на технологическое присоединение к электросетям, проектной документации и определении технических требований, в первую очередь, к преобразовательному оборудованию как ключевому элементу ГО ВИЭ.
3. Локализация компонентов СЭС и ВЭС в рамках национальной программы поддержки ВИЭ с освоением серийного производства кремниевых солнечных фотоэлементов и преобразовательного оборудования может дать синергетический эффект и расширить не только потребности в элементной базе для силовой электроники и соответствующий рынок сбыта, но и ресурсную базу для их производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Отчет о глобальном состоянии возобновляемой энергетики (GSR), Всемирная сеть по энергетической политике 21 века (REN21), 2016.
2. Global trends in clean energy investment. Report Bloomberg New Energy Finance (BNEF), 2017.
3. Автономные и гибридные инверторы и MPPT-контроллеры. Материалы сайта www.invertor.ru
4. Y.N. Kucherov, D.N. Yarosh, Y.G. Fedorov, A. Oudalov. An analysis of technical aspects of smart grid technologies integration into power system of megacity // CIGRE International Symposium «The electric power system of the future — Integrating supergrids and microgrids», Bologna, Italy; 13–15 September 2011.
5. М.М. Ботвинник. Асинхронизированная синхронная машина. М.: Госэнергоиздат, 1960.
6. Ю.Г. Шакарян, П.В. Сокур, Н.Д. Пинчук, О.В. Антонюк, В.Ю. Новожилов. Асинхронизированные машины для электроэнергетики // Энергия единой сети. 2016. № 4.
7. ГОСТ Р 55890-2013. ЕЭС и изолированно работающие энергосистемы. ОДУ. Регулирование частоты и перетоков активной мощности. Нормы и требования.
8. СТО 59012820.29.240.001-2011. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем.
9. Ю.Н. Кучеров, П.К. Березовский, П.В. Илюшин, Ф.В. Веселов. Нормативно-техническое регулирование интеграции источников распределенной генерации, включая ВИЭ, в энергосистему. Материалы совместного заседания НТК НП «НТС ЕЭС», ПК-5/ТК016 «Электроэнергетика», Москва, 8 июля 2015 г.
10. Fault Current Contributions from Wind Plants. Prepared by the Joint Working Group. IEEE Power and Energy Society 2013.
11. M.R. Banaei, Vahid Rezanejad Asl Bonab. Wind Turbine Control Based DFIG with Reduced Switches AC/AC Converter. IJRDET, April 2014.
12. V. Gevorgian, E. Muljadi. Wind Power Plant Short Circuit Current Contribution for Different Fault and Wind Turbine Topologies. Preprint. NREL. Québec, Canada, October 18–19, 2010.
13. D. Fonteyne, P.L. Khilar, M. Boden. Design consideration associated with DolWin3 and evolution of GE's Grid Solutions Business VSC Solution. B4-132. CIGRE, 46 Expert Sessions, Paris, August 2016
14. ГОСТ Р 51991-2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования.

ОСЦИЛЛОГРАММЫ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КЗ И СООТВЕТСТВУЮЩИХ ТОКОВ ИНВЕРТОРОВ С ФУНКЦИЕЙ FRT

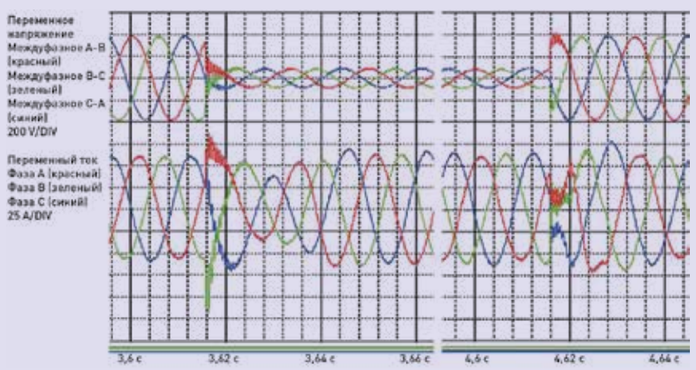


Рис. 20

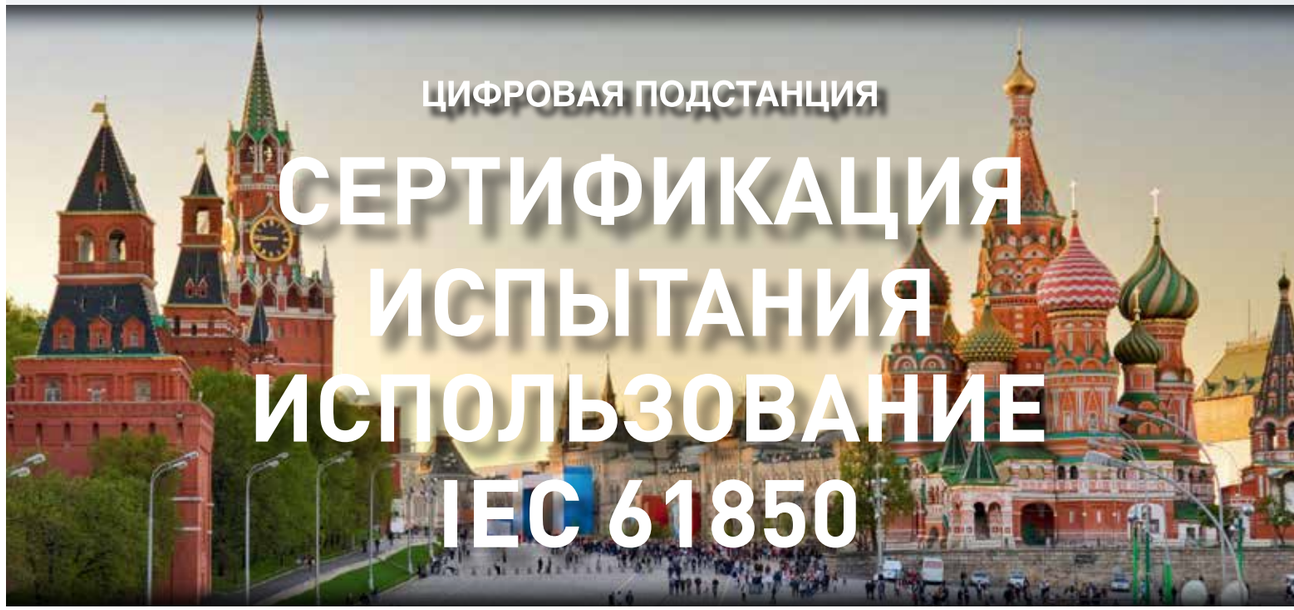
МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ЦИФРОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ
СТАНДАРТ IEC 61850
МОСКВА, 3–5 ОКТЯБРЯ 2017 ГОДА

3-5 ОКТЯБРЯ 2017 ГОДА

ЦЕЛИ КОНФЕРЕНЦИИ:
• обобщение результатов внедрения оборудования, поддерживающего стандарт IEC 61850;
• продвижение передового опыта.

В РАМКАХ КОНФЕРЕНЦИИ:
• встреча европейской группы пользователей стандарта IEC 61850
• совместное обсуждение отечественными и специалистами европейской группы пользователей актуальных тем:
– сертификация оборудования на соответствие IEC 61850;
– внедрение технологии «Цифровая подстанция» (ЦПС) в Европе и РФ;
– тенденции в области разработки новых технических решений для реализации технологии ЦПС;
– вопросы проектирования подстанций по технологии ЦПС «Инструментальные средства проектирования»;
– комплексные полигонные испытания оборудования: цели, задачи, методы;
• выставка продукции российских и зарубежных компаний, оборудование которых реализовано на базе стандарта IEC 61850

cigré Российский Национальный Комитет
cigré B3 Подстанции
cigré A3 Высоковольтное оборудование



При поддержке:
ФСК ЕЭС
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»
DNV·GL KEMA Laboratories

115201, г. Москва, Каширское шоссе, д. 22, корп. 3
IEC61850@ntc-power.ru
Тел.: (495) 727-19-09, (495) 981-94-00
Факс: (495) 727-19-08, (495) 981-94-01
www.IEC61850.ntc-power.ru