



Подкомитет РНК СИГРЭ В4

Применение силовой электроники при строительстве объектов генерации на основе ВИЭ и особенности их интеграции в электрические сети.

КРАМСКОЙ Ю.Г.

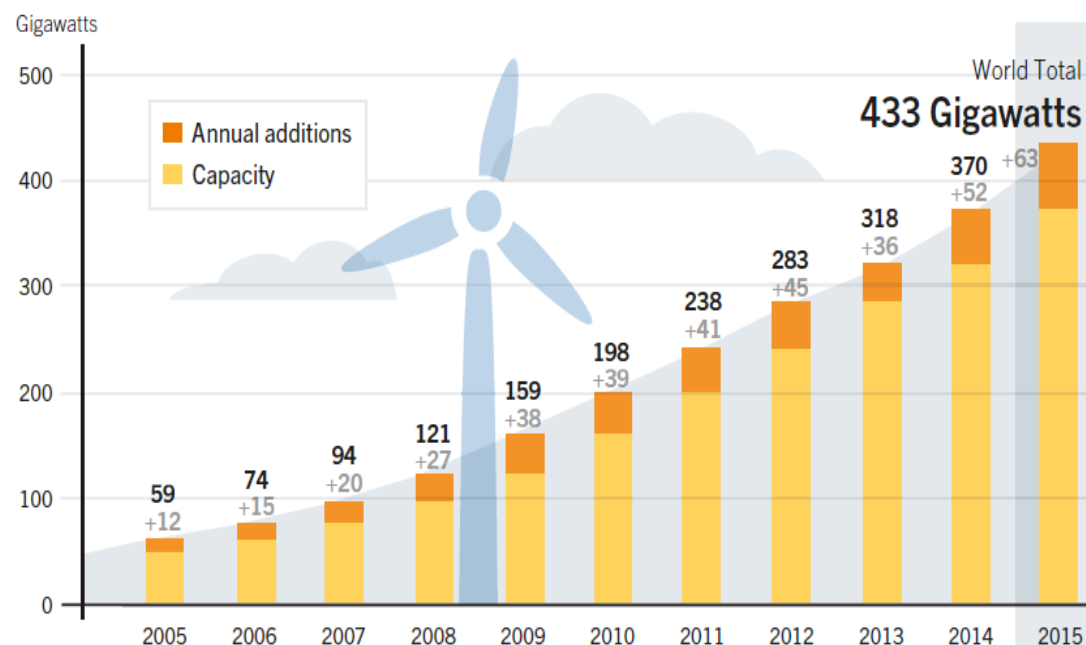
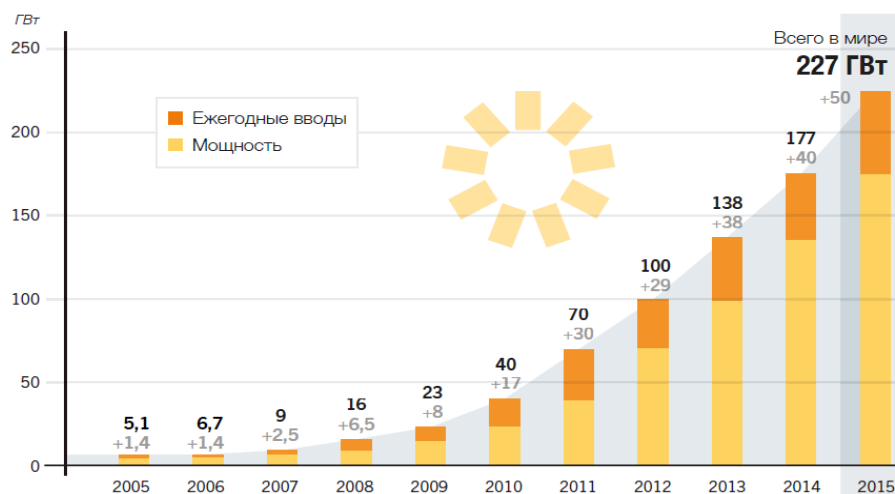
ООО «Солар Системс» - главный инженер по инверторному оборудованию и вторичным системам
НП по развитию ВИЭ «ЕВРОСОЛАР Русская секция» - эксперт



ВИЭ в мире

Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мире приобрело характер глобального тренда, в т.ч. солнечных (СЭС) и ветряных (ВЭС) электростанций и установок различного масштаба, относимым к объектам распределенной генерации (РГ, DG), объединяющихся 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»), обеспечивающий окупаемость проектов и возврат вложенных инвестиций.

В 2015 году мировая «зеленая» энергетика впервые в истории показала более быстрый рост, чем традиционная - построены более **63 ГВт ВЭС и 50 ГВт СЭС**, их общая установленная мощность достигла 433 и 227 ГВт соответственно, из которых 144 и 45 - в Китае. 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 прогнозу МЭА к 2030г «зеленая» энергетика будет составлять более 42% в мировой структуре производства энергии.



Мировая установленная мощность СЭС и ВЭС и ежегодные объемы ввода

ВИЭ в России

Россия также не осталась в стороне от данного глобального тренда, хотя и с некоторым запозданием, – в 2013г дан старт масштабному строительству электростанций, функционирующих на основе **ВИЭ мощностью свыше 5 МВт** (малые ГЭС, ВЭС и фотовольтаические СЭС) в рамках Договоров поставки мощности на оптовый рынок электроэнергии (ДПМ ВИЭ), а с 2015г государственная поддержка расширена на розничный рынок (РРЭ), в т.ч на сетевые проекты менее 5 МВт (покрытие 5% потерь в расред.сетях) и на установки ВИЭ в изолированных энергорайонах. Запланированные в РФ объемы строительства до 2024г - 3,6 ГВт ВЭС и 1,5 ГВт СЭС, из которых уже **введены в эксплуатацию более 70 МВт**.

Одно из основных требований к указанным проектам в РФ – обеспечение локализации производства компонентов, оборудования и материалов на территории страны. Существенный вклад в степень локализации проектов ВИЭ на данный момент может обеспечить пром.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), обеспечивающего 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 т.ч. 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.

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.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Инвертор, конвертер, двунаправленный, гибридный, MPPT-контроллер, частотный преобразователь, силовая электроника, ВИЭ, DER, СЭС, ВЭС, DFIG, накопитель энергии, СНЭ, V2G, ESS.

Типы преобразовательной части СЭС и ВЭС

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

- **автономные** (off-grid) установки мощностью до сотен кВт, питающие одно- или 3-фазную 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 кВт и электростанции до сотен МВт, 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).



Автономная гибридная дизель-солнечная энергоустановка 100 кВт Республика Алтай

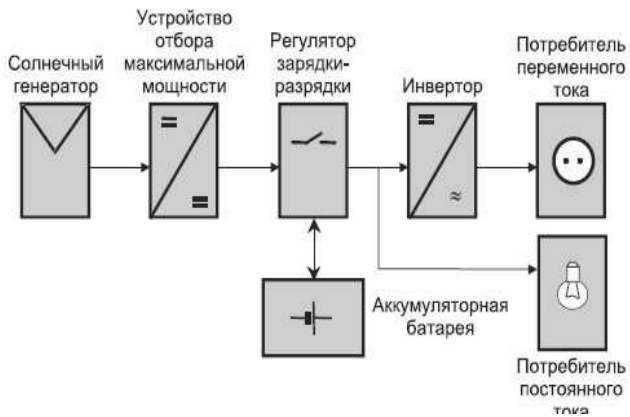


Промышленная сетевая СЭС 250 кВт, питающая насосы солнечной тепловой в р-не Астрахани котельной

Для применения на удаленных объектах или изолированных энергорайонах большой интерес представляют автономные **гибридные** установки (АГУ), включающие ФЭМ, ВЭУ и резервные дизель-генераторы, обеспечивающие совместно надежное круглосуточное электроснабжение потребителей, минимальный расход топлива (экономия до 90%) и эффективное использование ресурса АКБ (циклы заряд/разряд) и дизель-генератора (мото-часы).

Крупнейшая в мире автономная гибридная система (microgrid) запущена в октябре 2016 в высокогорном районе Тибета, в её состав входит СЭС 13МВт и накопитель энергии (ESS) емкостью 7 МВт*час

Схемы и параметры автономных преобразовательных установок СЭС и ВЭС



Автономные преобразовательные установки включают:

- источник энергии - ветрогенератор или группу солнечных панелей малой мощности;
- MPPT-контроллер (DC-DC-преобразователь), управляющий режимом работы источника для отбора мощности в точке максимума, обеспечивающий нормированное выходное напряжение;
- согласующее зарядное устройство для АКБ с напряжением DC 12/24/48В (бытовые и малые коммерческие установки) или 96-384 В (промышленные установки);
- группу последовательно-параллельно соединенных АКБ требуемого напряжения и емкости;
- **автономный** инвертор, преобразующий напряжение АКБ вместе со встроенным (развязывающим) трансформатором до стандартного для питания нагрузки переменного тока.

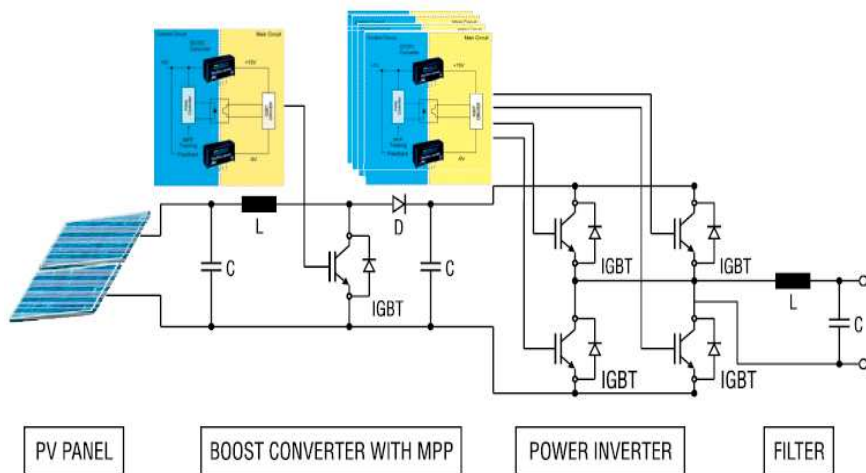
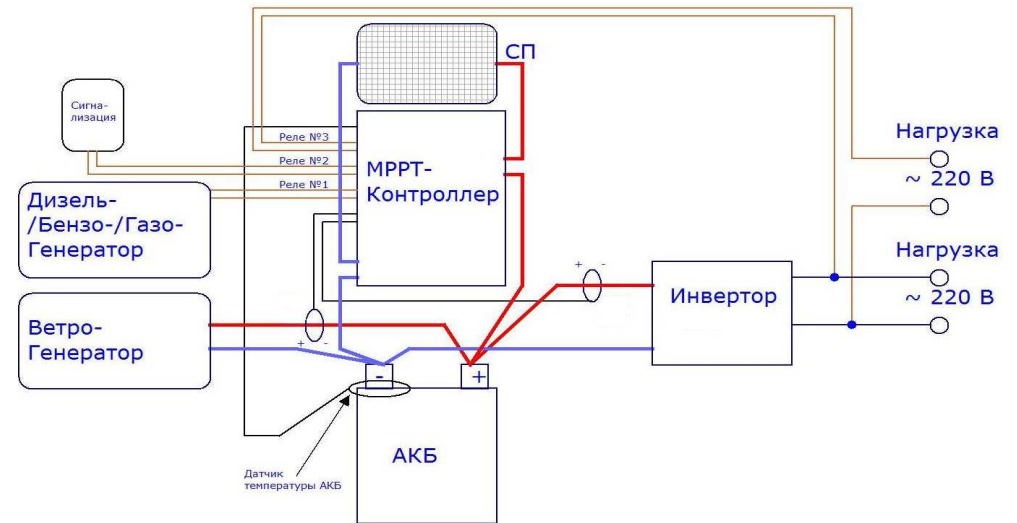
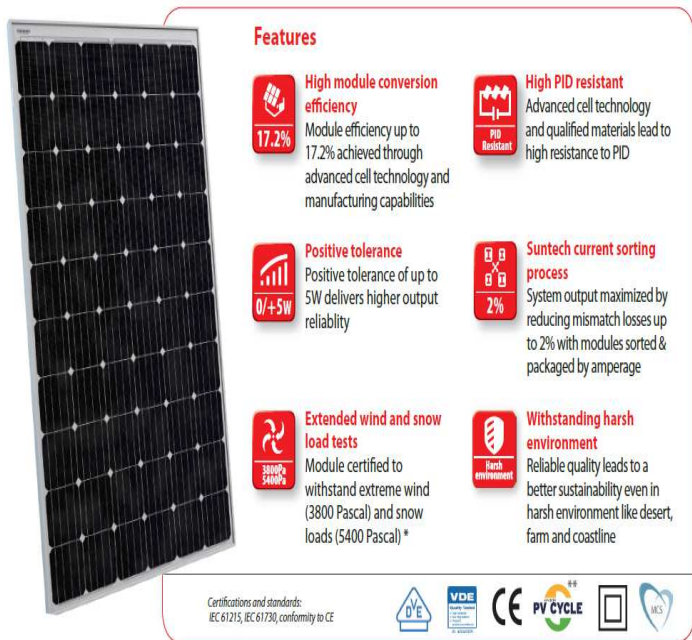


Схема солнечного инвертора с интегрированным MPPT-контроллером



Пример структурной схемы автономного инвертора в составе АГУ



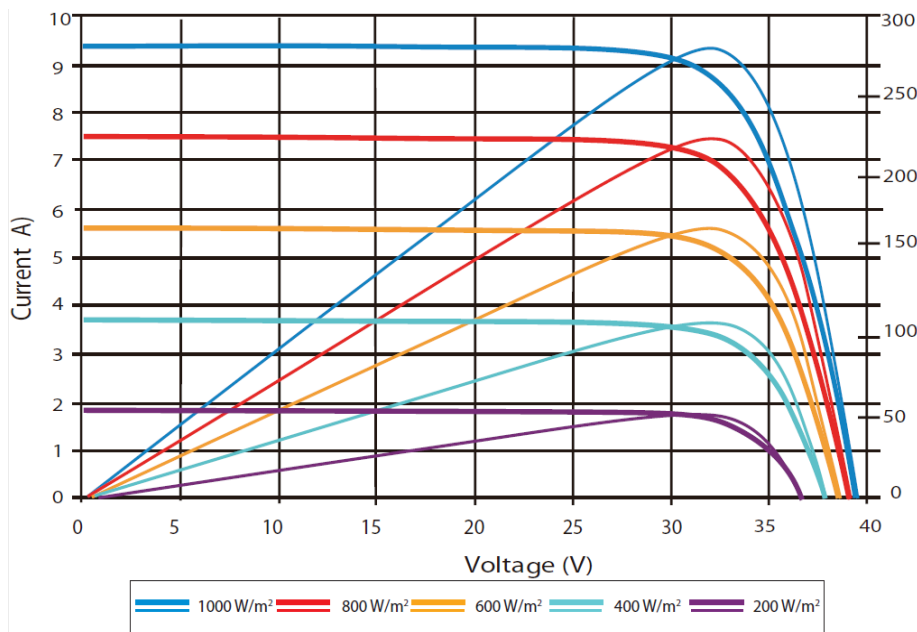
Features

- High module conversion efficiency**
17.2%
Module efficiency up to 17.2% achieved through advanced cell technology and manufacturing capabilities
- High PID resistant**
Advanced cell technology and qualified materials lead to high resistance to PID
- Positive tolerance**
0/+5W
Positive tolerance of up to 5W delivers higher output reliability
- Suntech current sorting process**
2%
System output maximized by reducing mismatch losses up to 2% with modules sorted & packaged by amperage
- Extended wind and snow load tests**
3800 Pa / 5400 Pa
Module certified to withstand extreme wind (3800 Pascal) and snow loads (5400 Pascal)*
- Withstanding harsh environment**
Harsh environment
Reliable quality leads to a better sustainability even in harsh environment like desert, farm and coastline

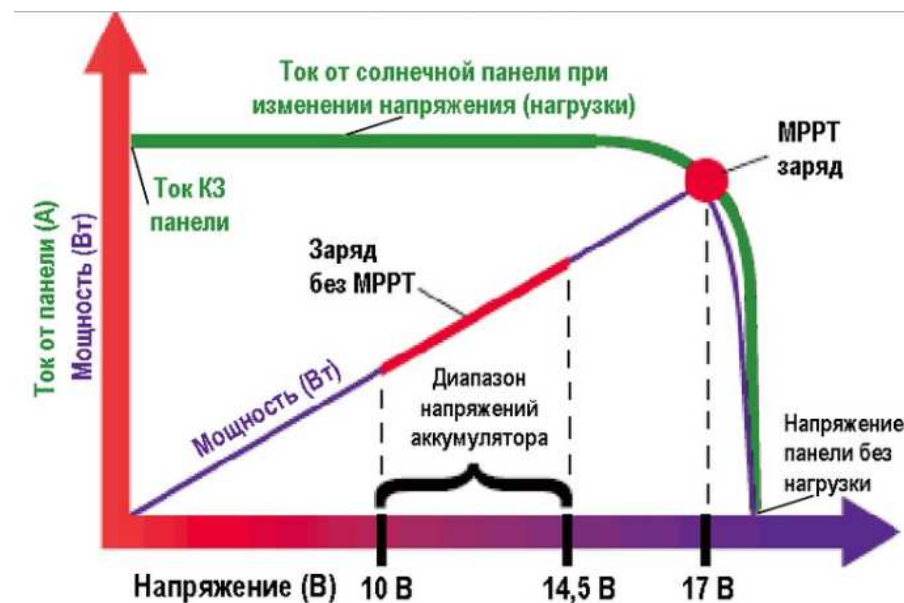
Certifications and standards: IEC 61215, IEC 61730, conformity to CE

Фотоэлектрические солнечные панели/модули (ФЭМ), являющиеся источниками тока, пропорционального инсоляции (изготавливаемые по тонкопленочной или кремниевой мульти/моно-кристаллической технологии), имеют мощность 125-340 Вт, нормированную при стандартных условиях и инсоляции 1000 Вт/м².

В составе фотоэлектрических энергоустановок они собираются в цепочки (стринги) с максимальным напряжением DC 24-250 В (бытовые установки) или 600/1000 В (новый американский промышленный стандарт - 1500В), которые подключаются ко входу MPPT-контроллер, при необходимости параллельно по несколько стрингов. Количество ФЭМ в цепочке ограничено суммарным напряжением холостого хода в условиях сочетания максимальной мгновенной инсоляции и минимальных температур в районе размещения СЭС с учетом собственных ФЭМ отрицательных температурных коэффициентов :
- 0,45%/гр.С (по мощности) и - 0,35%/гр.С (по напряжению XX).



Типичная зависимость мощности от инсоляции (Вт/м²) и ВАХ монокристаллического ФЭМ (280Вт).



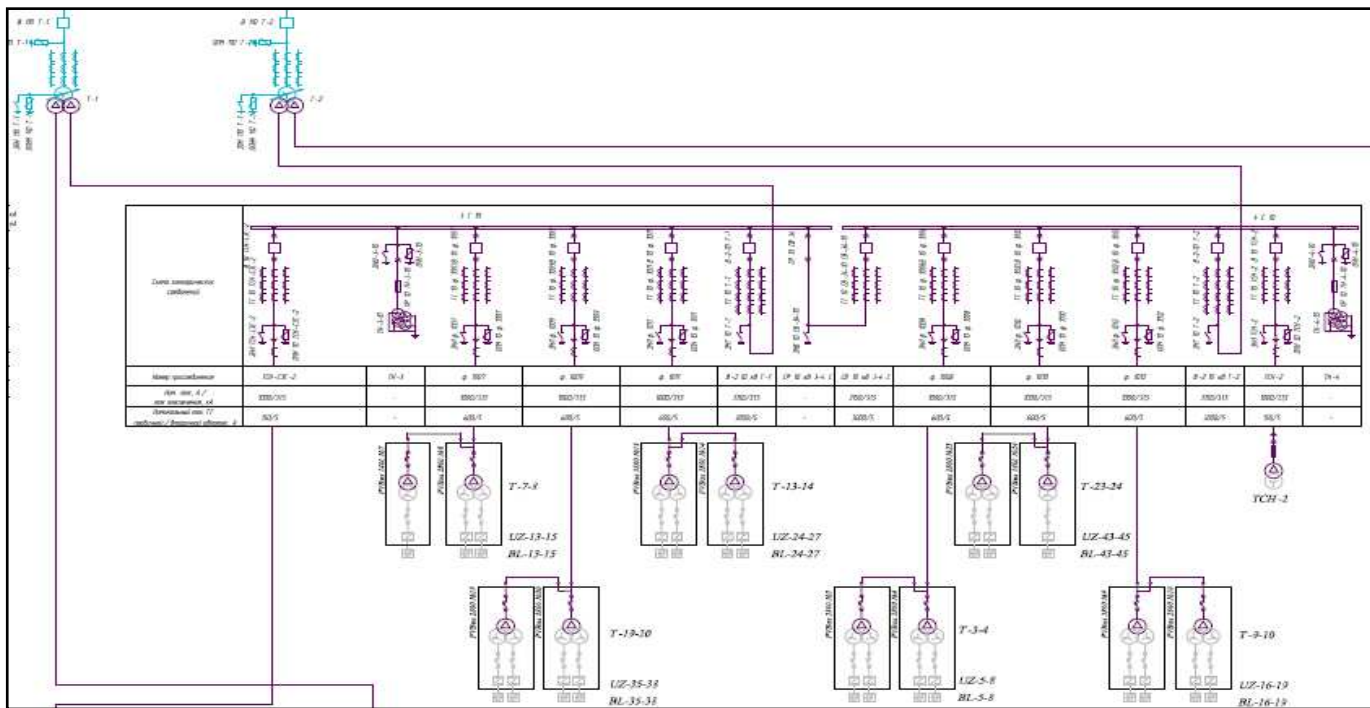
Преимущество контроллера с MPPT по сравнению с PWM (ШИМ-преобразованием)

Промышленные СЭС на основе сетевых инверторов.

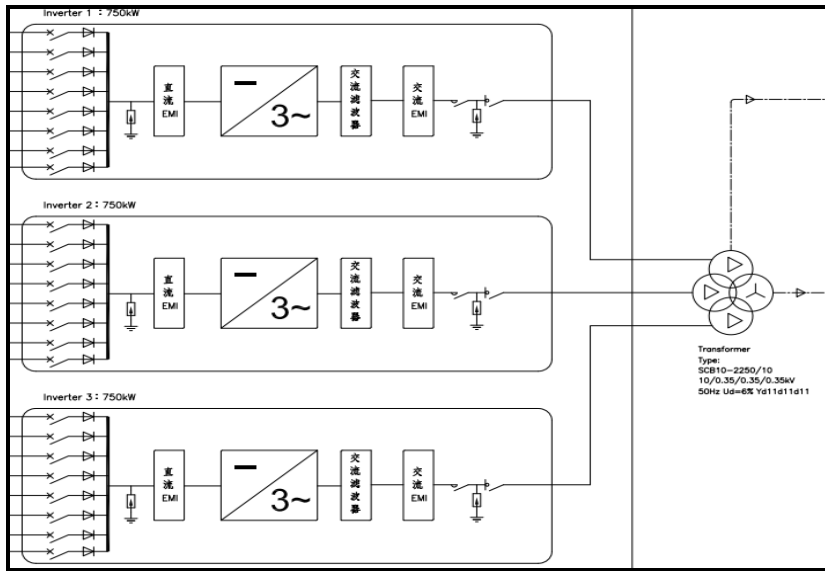
Современная солнечная установка промышленного масштаба или электростанция состоит из повторяющихся конструктивных элементов-модулей, размещаемых на крышах зданий (roof-top) или на земле:

- 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) и 3-фазных сетевых инверторов, соединенных с цепочками кабельной системой постоянного тока (600-1500В), подключенных на выходе к повышающим трансформатором со стандартным напряжением уровня НН или СН (до 40кВ).

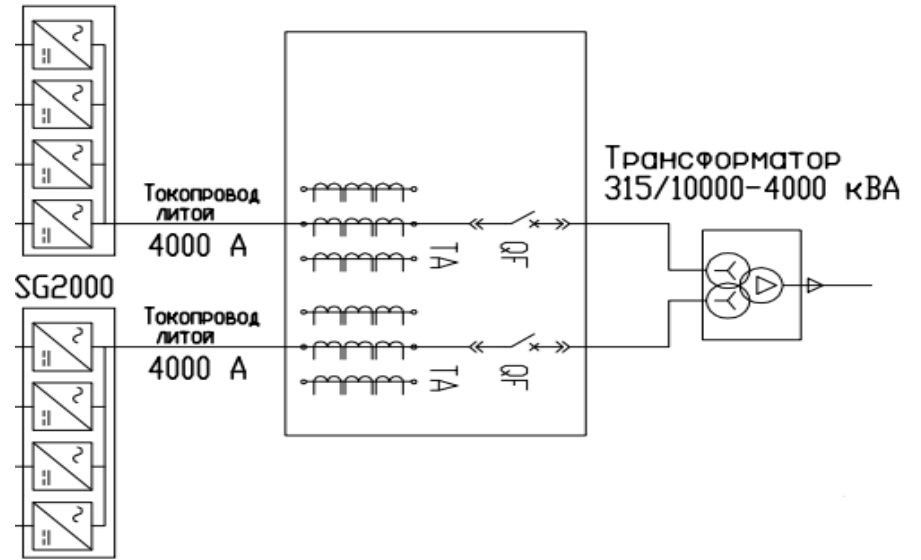
Сетевые инверторы являются ведомыми, осуществляющими подстройку под внешнее опорное напряжение по уровню, частоте и фазе, синхронизирующиеся с промышленной сетью. Типовые схемы СЭС включают группы центральных инверторных установок (мощностью 500-5000кВА), обеспечивающих выдачу в электросети энергии от больших массивов ФЭМ (до сотен МВт), согласование и управление параметрами режима, интеграцию генерирующих объектов и их систем контроля, защиты и управления в энергосистему.



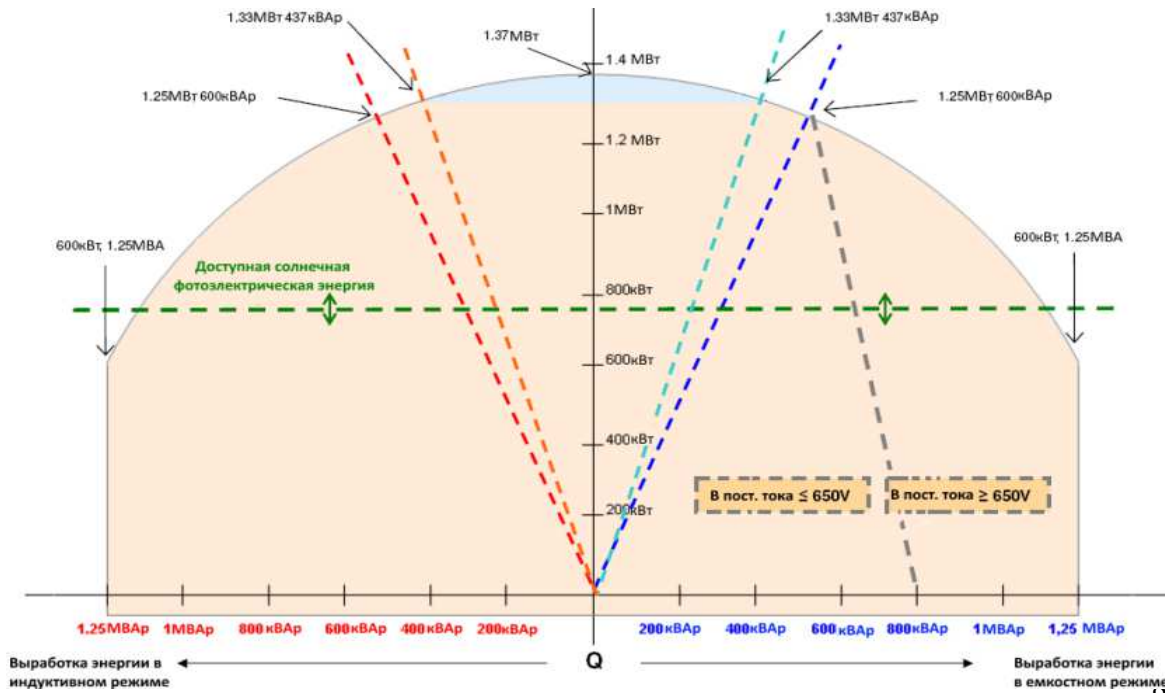
Фрагмент однолинейной схемы крупной СЭС на основе центральных инверторов, включающей повышающую ПС 10/110кВ и силовые трансформаторы с расщепленной обмоткой СН.



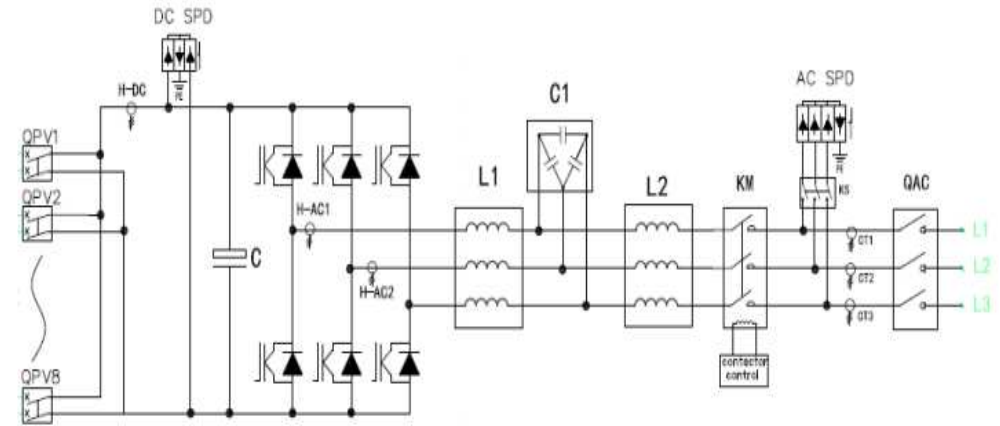
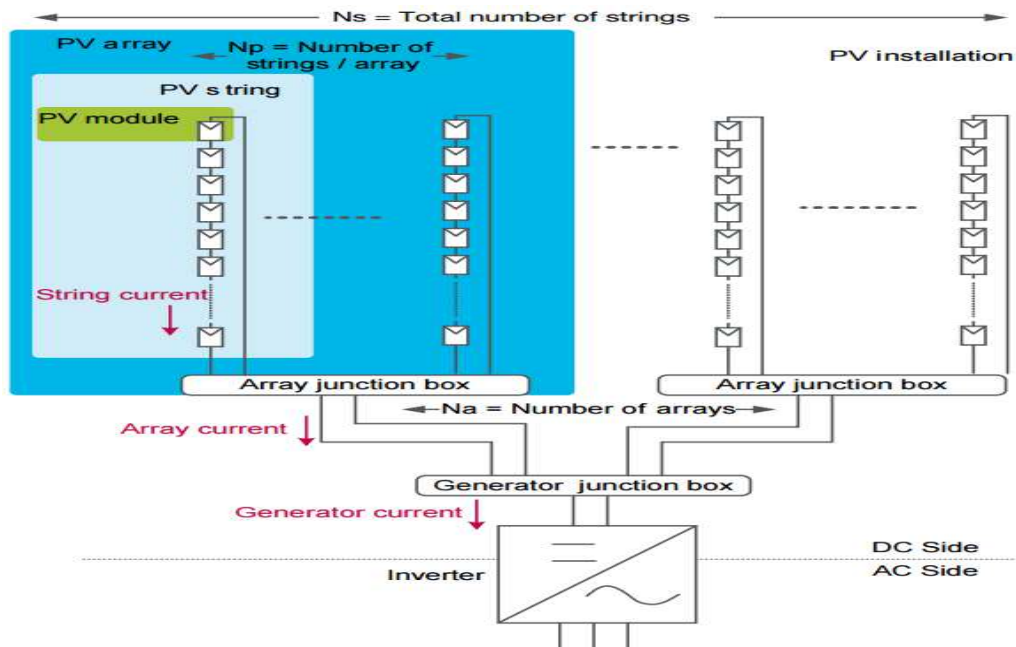
Пример распространенной схемы блочно-модульной инверторной установки (БМИУ) с подключением инверторов к индивидуальным обмоткам повышающего трансформатора.



Вариант БМИУ с параллельным включением выходов центральных инверторов, жестко синхронизированных между собой общим контроллером.

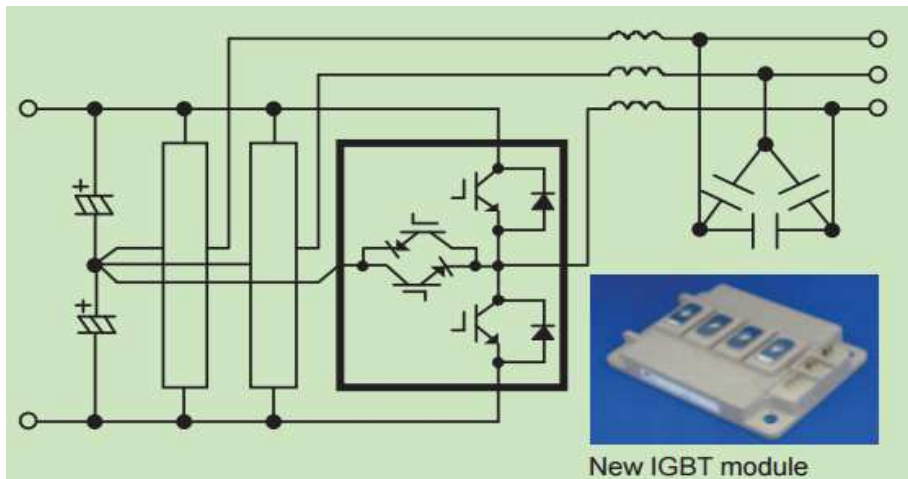


Пример диаграммы выдачи мощности современного центрального инвертора с регулированием и поддержанием активной и реактивной мощности или $\cos\Phi$ в широких пределах.

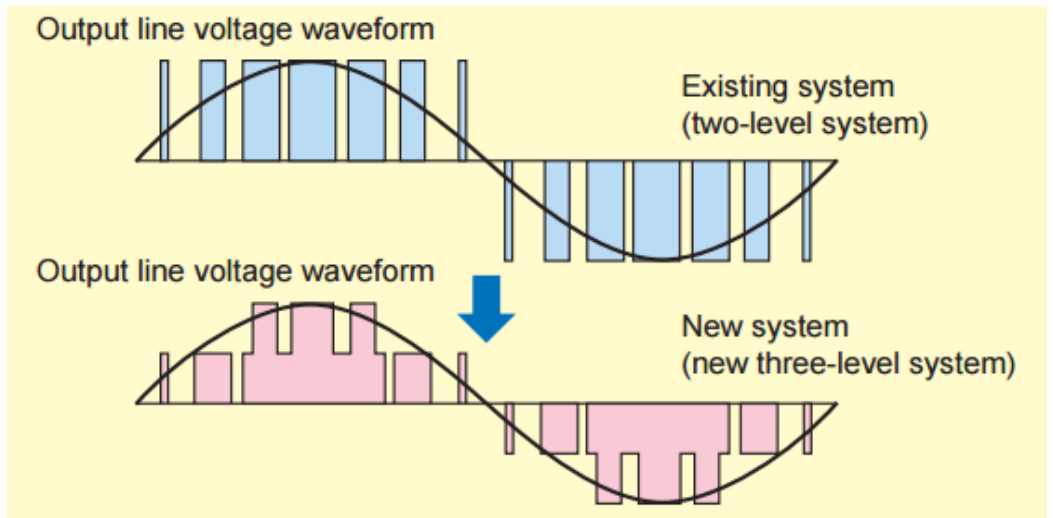


Принципиальная схема типичного солнечного 3-фазного инвертора на мощных IGBT-ключях

Структурная схема цепей постоянного тока солнечного центрального инвертора, включающая цепочки ФЭМ, сумматоры (Array box) и вводной шкаф.



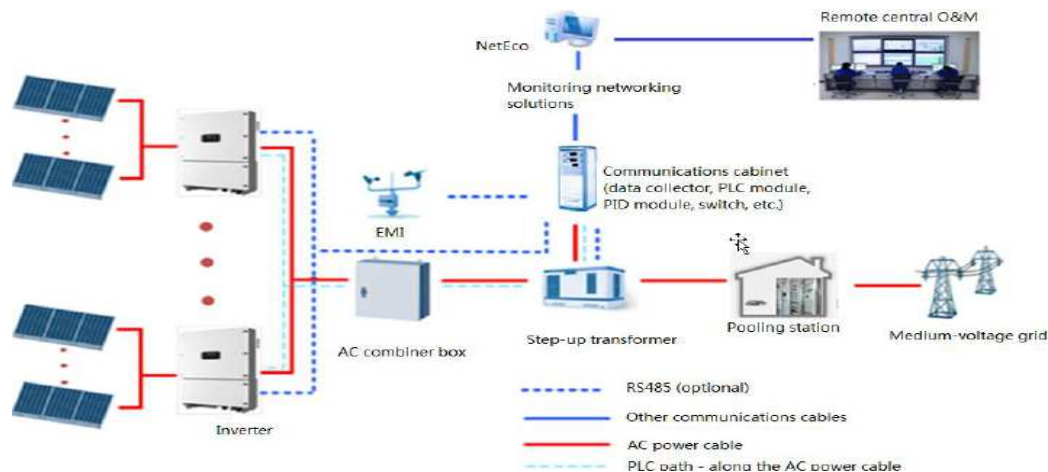
Новый тип интегрированных RB-IGBT модулей, подключаемых по T-образной схеме



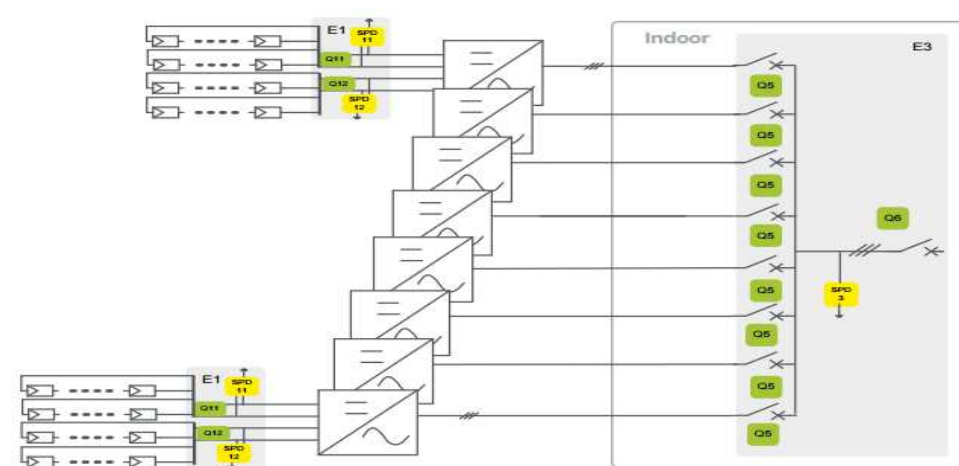
Графики выходного напряжения типовых 2-х и новых 3-х уровневых инверторных систем на основе RB-IGBT, значительно повышающих эффективность преобразователя и качество синусоиды [11]

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);
- все более широкое применение распределенной модульной схемы на основе малогабаритных “стринговых” инверторов вместо центральных (и даже микро-инверторов на каждый ФЭМ), позволяющей легко наращивать мощность блока параллельным или шлейфовым соединением выходных цепей инверторов.



Структурная схема промышленной СЭС на основе стринговых инверторов, включающая систему мониторинга и управления инверторами по силовой цепи (PLC)



Объединение стринговых инверторов в группы с параллельным или шлейфовым включением выходных цепей через распределительный шкаф переменного тока (E3/AB) с напряжением 380 или 480/ 690 В.

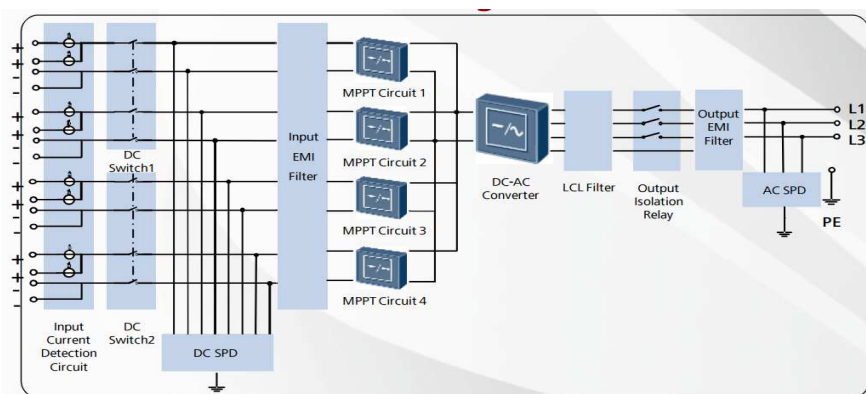
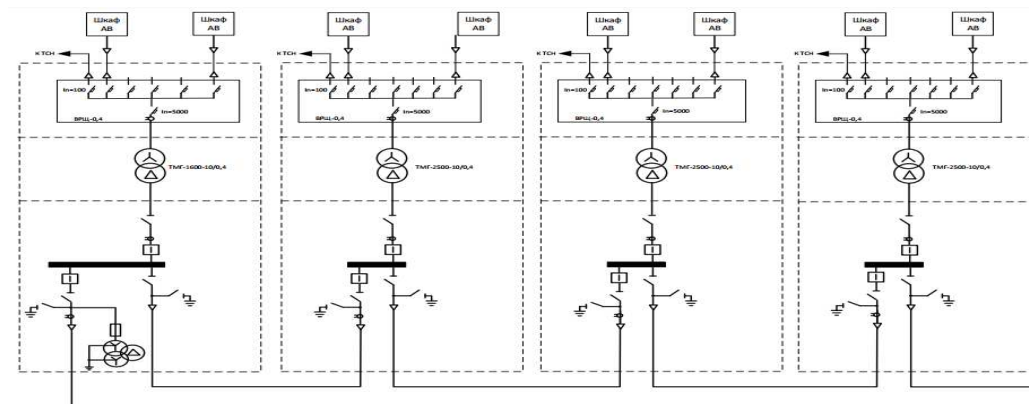


Схема стрингового инвертора с 4-канальным MPPT-контроллером и выходом 0,4кВ для прямого подключения к сетям низкого напряжения или для промышленной СЭС с распределенной схемой.



Перспективная распределенная схема СЭС на основе групп стринговых инверторов, объединенных в БМИУ с использованием типовых КТП 10/0,4кВ и шлейфовым подключением к шинам ПС 110/10кВ.



Крупнейшая в мире наземная СЭС мощностью 1ГВт (Yanchi, Китай), введенная в эксплуатацию в июне 2016 построена по распределенной схеме на основе стринговых смарт-инверторов (включает ~ 90.000 МРРТ-входов)

Преимущества использования распределенной модульной схемы СЭС на стринговых инверторах:

- 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 кВт до сотен МВт, не требующая больших кап.вложений и позволяющая использовать типовые КТП 0,4/10-35кВ;
- надежная распределенная схема с большим количеством МРРТ-входов, подключаемых непосредственно к цепочкам, что повышает отдачу ФЭМ и сокращает потери, увеличивая общую выработку энергии на 3-5%;
- при повышенной стоимости (на 1кВт) непосредственно таких инверторов по отношению к центральным, общий CAPEX на строительство СЭС сопоставим в обоих вариантах, однако OPEX и итоговая стоимость энергии (LCOE) ниже для варианта на стринговых инверторах.



**Крупнейшая в мире
накрышная (rooftop-mounted)
СЭС общей мощностью
300МВт (Нaining, Китай)**

Современные типы сетевых ВЭС.



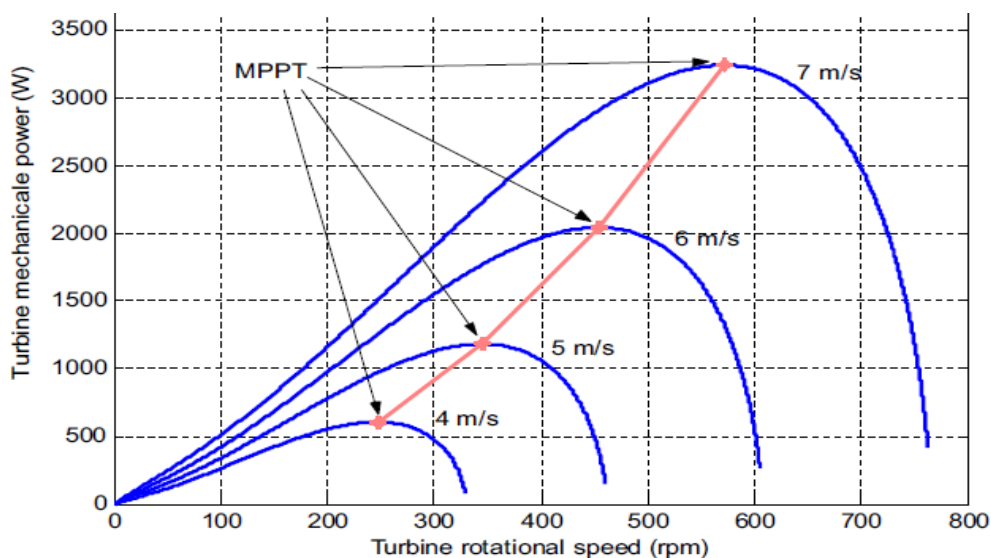
В ветрогенераторах малой и средней мощности применяются обычные генераторы постоянного или переменного тока, в т.ч. с фазным или КЗ-ротором или постоянными магнитами, которые обычно подключаются через простой выпрямитель или МРРТ-контроллер.

Практически все вновь строящиеся ВЭС мегаваттного класса, 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 двунаправленным инвертором (частотным преобразователем на IGBT-транзисторах) в цепи ротора или синхронных машин **с полномасштабным конвертером 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 отдачу ВЭУ в точке максимальной эффективности отбора мощности (МРРТ).

Необходимо отметить, что одними из первых в мире работы по созданию и практическому применению асинхронизированных машин (АСМ) в электроэнергетике были развернуты в 1950-х гг. в СССР по инициативе и под научным руководством д.т.н. 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 3-х фазным шихтованным ротором), что обусловлено рядом уникальных свойств АСМ:

- может работать в широком диапазоне изменений частоты вращения;
- векторный принцип регулирования возбуждения позволяет отдельно и независимо друг от друга регулировать активную и реактивную мощность, что делает статическую устойчивость АСМ независимой от параметров режима;
- АСК с маховиками улучшают устойчивость энергосистемы, повышают надежность и пропускную способность ЛЭП стабилизируя напряжение по величине и фазе (эффект “жестких шин”);
- при установке на промежуточных 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 [6]. Аналогичных эффектов можно достичь и с применением асинхронизированных ветрогенераторов мегаваттного класса, обладающих значительной инерционностью, особенно при существенной для энергосистемы суммарной мощности АСГ ВЭУ (100-150 МВА).



Характерный график зависимости мощности ВЭУ от частоты вращения ротора при различных скоростях ветра с графиком максимальной эффективности отбора.

Generator	
Line-Line Voltage (RMS)	690 V
Frequency, No. of Pole Pairs	60 Hz, 2
Stator Resistance, Leakage Inductance (p.u.)	0.016, 0.06
Rotor Resistance, Leakage Inductance, both referred to Stator (p.u.)	0.016, 0.06
Magnetizing Inductance (p.u.)	2.56
Inertia Constant (s)	2
Converter	
Converter Maximum Power (p.u.)	0.5
Grid Side Coupling Inductance, Reactance (p.u.)	0.15, 0.0015
Nominal DC Bus Voltage	1200 V
DC Bus Capacitor	0.1 F

Пример параметров ВЭУ среднего класса типа III мощностью 750 кВт

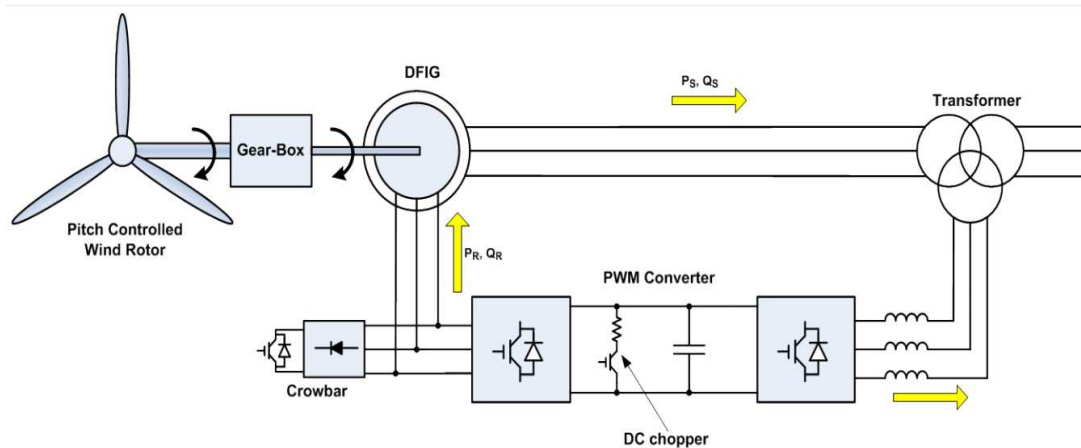
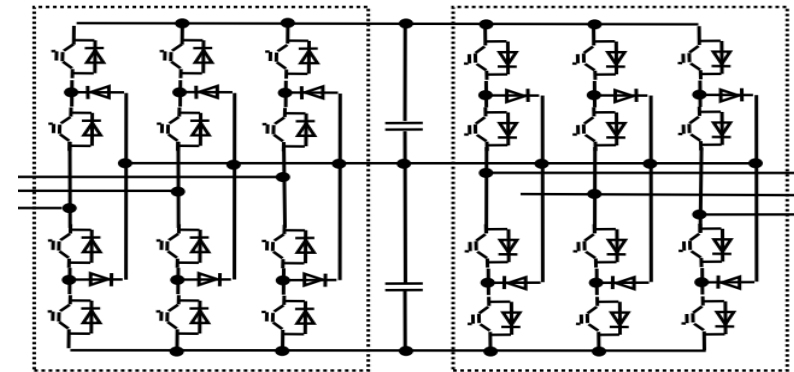


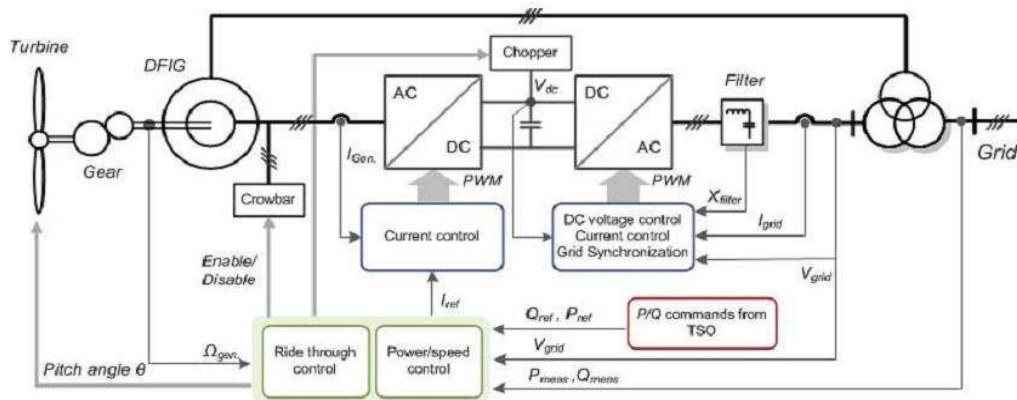
Схема ВЭУ III типа с двунаправленным АС-АС конвертером (частотным преобразователем) в цепи 3-фазного ротора.



Конвертер с трехуровневым активным выпрямителем и инвертором, с высоким ЭМС (без доп. фильтров, компенсаторов и других устройств), для применения в качестве полномасштабного (для СГ) или двунаправленного в цепи ротора (АСГ).

Ветро турбины III типа (DFIG) обеспечивают максимальное использование энергии ветра, автоматически управляя выходной мощностью в соответствии с графиком максимальной эффективности отбора, используя компенсационный АС/DC/АС конвертер в цепи симметричного многофазного (2х или 3х) ротора и предотвращая потери мощности в его цепи, эффективно используют мощность скольжения, одновременно понижая механические нагрузки. Характеристика крутящего момента является квадратичной функцией скорости вращения, а оптимальная максимальная эффективность **отбора мощности - функция куба скорости** вращения. 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 компромисом.

Для определения **установленной мощности всей ВЭУ** на основе АСГ III типа необходимо учитывать (кроме параметров механической части ветроустановки и лопастей) возможность долговременной выдачи активной мощности с ротора, вращающегося на сверхсинхронной скорости, через двунаправленный конвертер в сеть и ее суммирование с мощностью, снимаемой непосредственно со статора (принимая во внимание наличие реактивной составляющей в выходных токах конвертера и значительной емкости конденсаторов в звене постоянного тока).



Параметры и схема управления двунаправленного конвертера для ВЭУ III типа

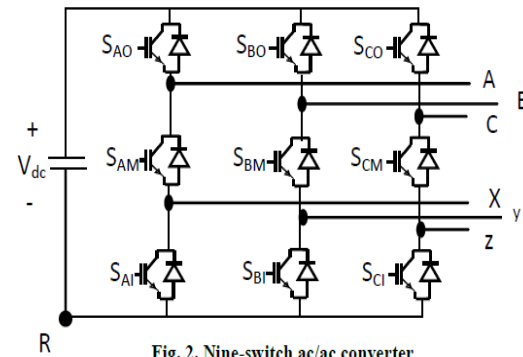


Fig. 2. Nine-switch ac/ac converter

Вариант экономичной матричной схемы конвертера на основе 9 IGBT-ключей для ВЭУ III и IV типа [11]

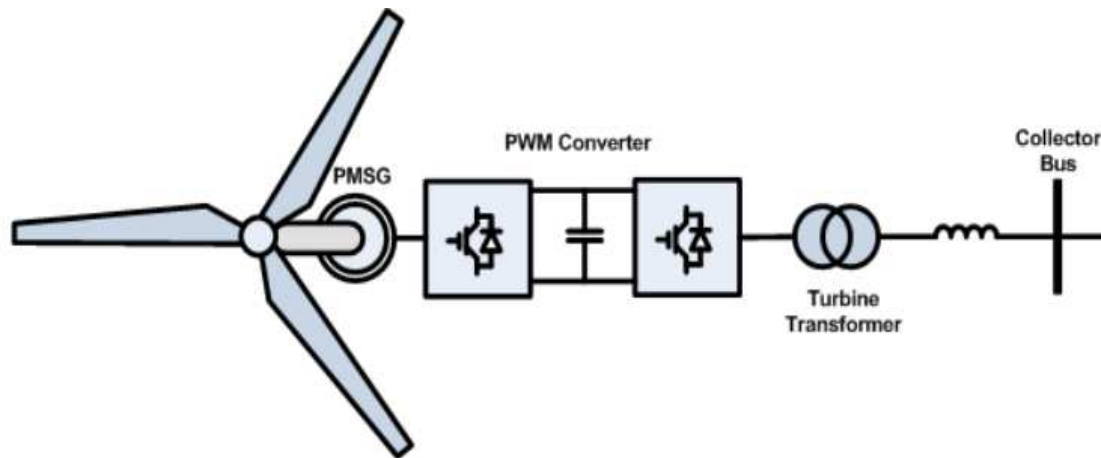


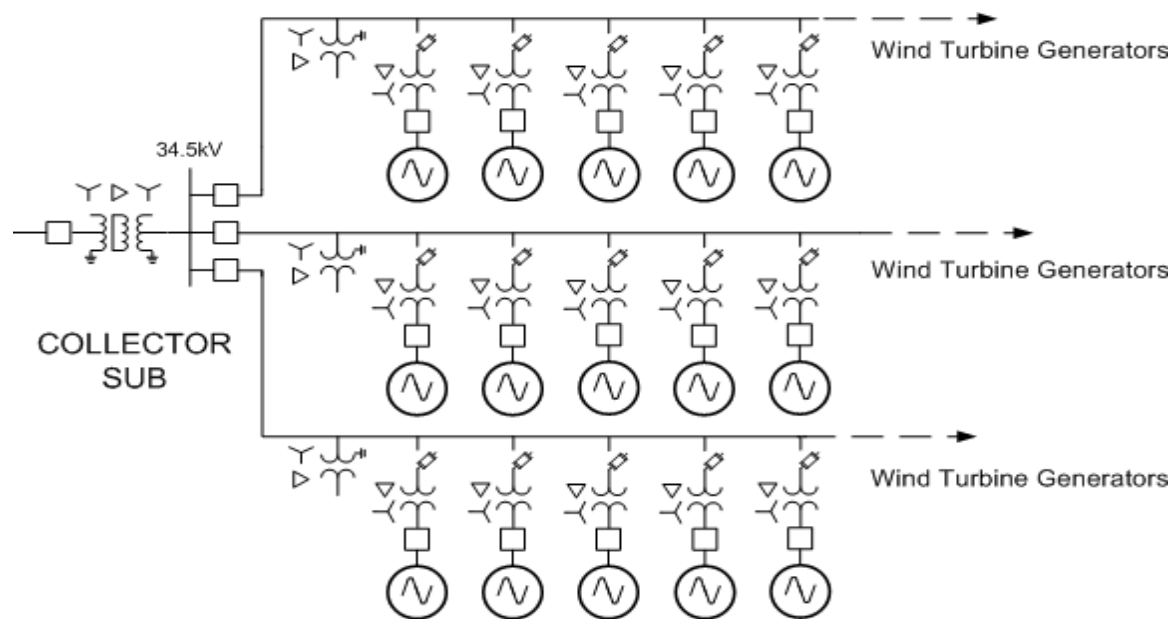
Схема ВЭУ IV типа с прямым приводом, синхронным генератором на постоянных магнитах (PMSG) и полномасштабным конвертером (PWM) в цепи статора.

Реализация преобразовательной части **ВЭУ IV типа** (с полномасштабным преобразователем в цепи статора) во многом аналогична схемам на основе центральных инверторов мегаваттного класса для СЭС. ВЭУ IV типа с переменной (в широких пределах) скоростью вращения турбины (с прямым приводом или

мультипликатором) и автоматическим полномасштабным конвертером (преобразователем частоты, мощностью равной генератору), обеспечивают полностью независимую скорость механического вращения и выходную частоту сети. Обмотка статора может работать на переменных частотах в любых аварийных ситуациях, генератор остается связанным с автоматическим конвертером и может быть изолирован от аварийных режимов, ограничивая выходной ток генератора в допустимых пределах (обычно 1,1-1,2 номинала). Такие ветротурбины выполняются многополюсными или на постоянных магнитах, что позволяет эксплуатировать их на малых скоростях исключая коробку передач (мультипликатор), увеличивая надежность, но вследствие относительно высокой стоимости, надежности и простоты схемы управления (по отношению к турбинам DFIG) они преимущественно используются в морских ВЭС (off-shore).

Типичные конфигурации ВЭС и СЭС мультимегаваттного масштаба включают:

- Группу однотипных ветротурбин или массив солнечных ФЭМ мощностью 500 – 5000 кВт (офшорные до 10 МВт)
- Каждый ветрогенератор (типовое выходное напряжение 480-690 В) или массив солнечных модулей с БМИУ (270-690 В) агрегируется в блок с силовым трансформатором, повышающим напряжение до уровня СН (10-40кВ).
- Внутростанционная (коллекторная) кабельная сеть среднего напряжения, связывающая несколько блоков с существующей повышающей подстанцией 110-220 кВ или вновь строящейся в составе схемы выдачи мощности станции (от 20 МВт), с преимущественно шлейфовыми соединениями блоков;
- Комплекс вторичных систем контроля (включая метеостанции), защиты и управления (локально или дистанционно из диспетчерского центра), системы учета электроэнергии и контроля её качества, а также система прогнозирования генерации и состояния оборудования.



Коллекторная сеть ВЭС со шлейфовым соединением ВЭУ на уровне СН

Требования к ГО ВИЭ при включении на параллельную работу с энергосистемой.

- В нормативной базе различных стран, касающейся в присоединения объектов РГ к энергосистемам (**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 т.ч. требования к основному оборудованию и системам регулирования ветряных и солнечных электроэнергетических установок в части их параллельной работы с энергосистемой.
- В России с точки зрения подключения к электросетям СЭС и ВЭС рассматриваются как объекты распределенной генерации, к которым предъявляется большая часть **типовых требований к электростанциям**. В отечественной практике это в первую очередь ПУЭ, ПТЭ электростанций и сетей, ПП 861 (в т.ч. Правила технол.присоединение к сетям), а также стандарты СО ЕЭС, касающиеся субъектов ОДУ, и регламенты ОРЭМ, предъявляющие требования в т.ч. 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: **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.
- **ВЭУ должны быть автоматизированы, в обязательный объем входят:**
 - ограничение частоты вращения ветроколеса на заданном уровне при высоких скоростях ветра;
 - 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 схему выдачи мощности (СВМ) или раздел проекта с расчетом ЭЭ режимов или внестадийно выполнить полноценную СВМ с учетом:

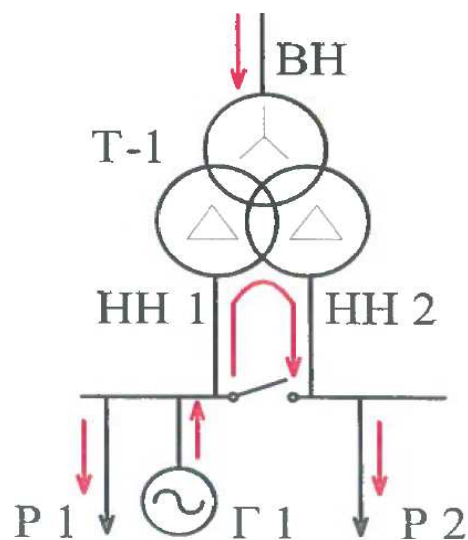
- назначения ГО, режима работы, схемы участия/неучастия в рынке электроэнергии,
- допустимой скорости набора и сброса нагрузки, наличие/отсутствие технологического минимума установки;
- максимальных мощностей в точках присоединения к сети.



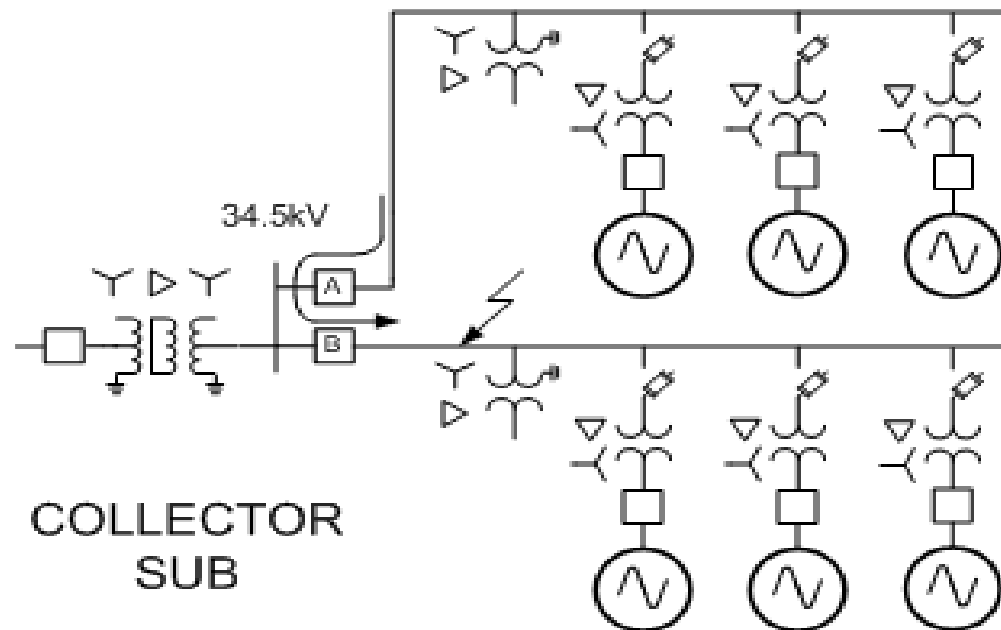
При проектировании на основе полученных ТУ на ТП необходимо проработать особенности существующих сетей в районе предполагаемого размещения, наличие каналов связи, существующей РЗА, ПА, ССПИ/ТМ, ожидаемый КИУМ и степень локализации ГО ВИЭ.

При выборе РЗА внутренней сети СЭС или ВЭС должны учитывать особенности данного источника (ФЭМ, ветрогенератор) и преобразовательного оборудования, а его связи с ПС следует рассматривать как линии с двусторонним питанием, соответственно необходимы:

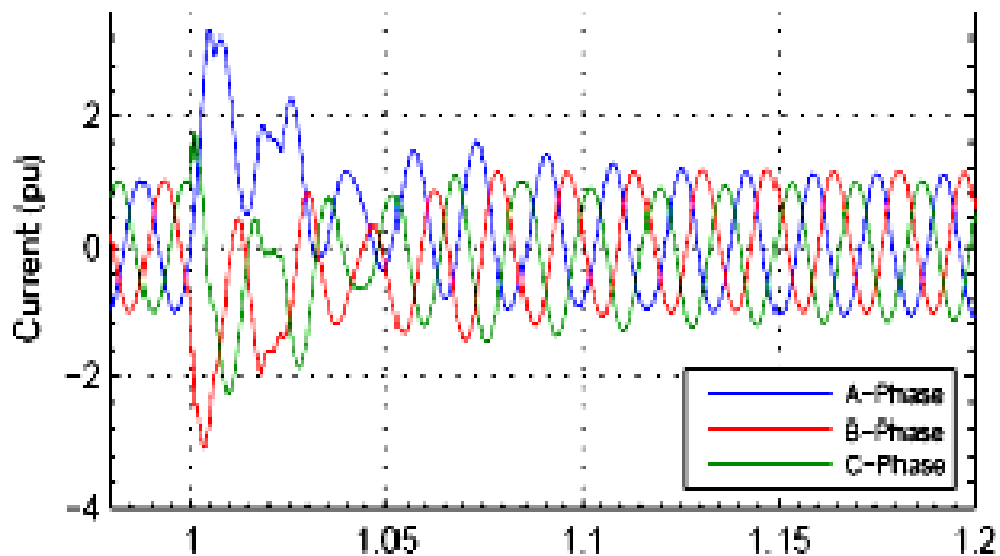
- сочетание направленных и ненаправленных токовых защит;
- координация уставок защит (или предохранителей) блочных повышающих трансформаторов и защиты смежных участков;
- организация диф.защиты и МТЗ на трансформаторах повышающей подстанции;
- для РУ/шин среднего напряжения желательна быстродействующая защита.



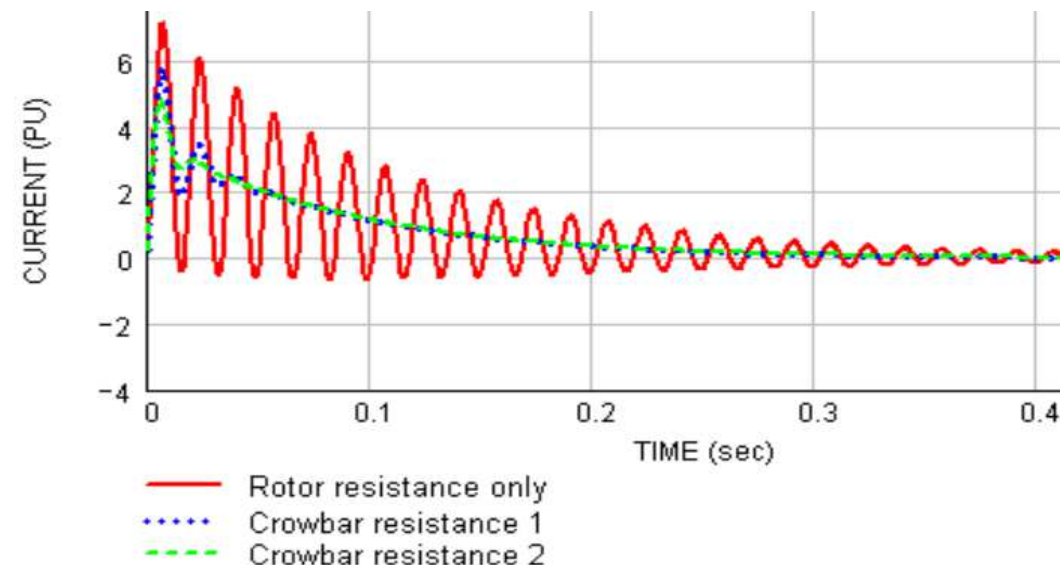
Недопустимый режим работы трансформаторов с расщепленной обмоткой низшего напряжения, применяемых на распределительных ПС 110/10 или 110/35/10 кВ, который может возникнуть при подключении мощных РГ.



Подпитка токов КЗ от смежных генераторов, которую необходимо учитывать при выборе силового оборудования и РЗА



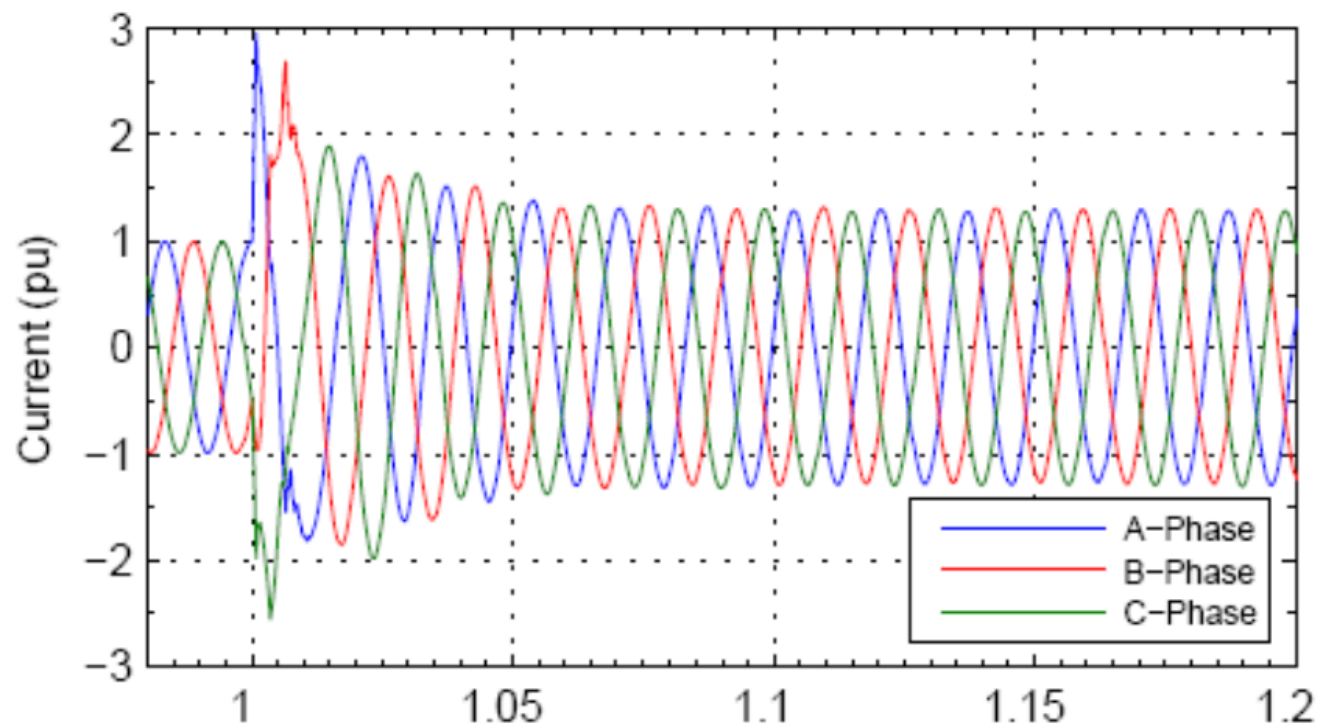
Характер изменения тока КЗ DFIG при длительном 3-ф КЗ



Изменение ТКЗ для DFIG в зависимости от сопротивления цепи ротора

Для учета токов КЗ от ветрогенераторов в условиях удаленных симметричных КЗ применяются системы регулирования, обеспечивающие поддержание **постоянства** активной либо реактивной **мощности**.

При более близких замыканиях в сети, сопровождающихся глубокими снижениями напряжения на шинах ветростанции, АСГ ВЭУ может быть переведен в различные режимы ограничения тока, в т.ч. с выдачей реактивной мощности взамен выдачи активной, а также в схемах управления током ротора предусмотрены защитные устройства, срабатывание которых шунтирует преобразователь и превращает машину двойного питания в обыкновенный асинхронный генератор.



Токи КЗ на ВЭУ с преобразователями, находясь в пределах 1.1-2.5 от номинального, приводят к достаточно сложно реализуемой по условиям надежности и селективности защите без вероятности ложного срабатывания.

Дополнительные требования, предъявляемые к объектам диспетчеризации

Для предотвращения и ликвидации технологических нарушений все субъекты генерации, находящиеся в зоне филиалов АО «СО ЕЭС», вне зависимости от рынка сбыта электроэнергии, которые должны отрабатывать нарушения нормального режима - снижение или повышение частоты, напряжения, асинхронный ход, перегрузка сечений, ЛЭП и оборудования.

Соответствующие требования :

- 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 в сетях;
- обеспечение немедленного отключения от сети по команде Системного оператора.

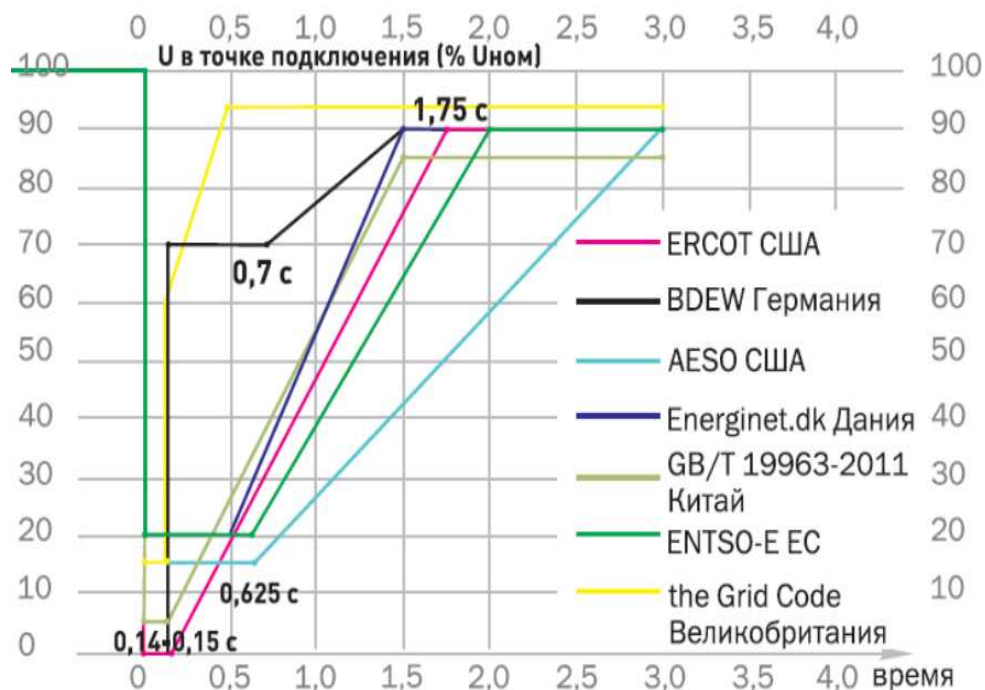
Генерирующее оборудование любых электростанции должно обеспечивать участие в ОПРЧ, при этом с учетом отсутствия технологической возможности по требованию увеличить выработку СЭС и ВЭС (ввиду ограниченности входного “топливного” ресурса) - при снижении частоты должно быть обеспечено надежное функционирование ГО в диапазонах частот (что коррелирует с требованиями стандартов BDEW и ENTSO-E к DER):

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

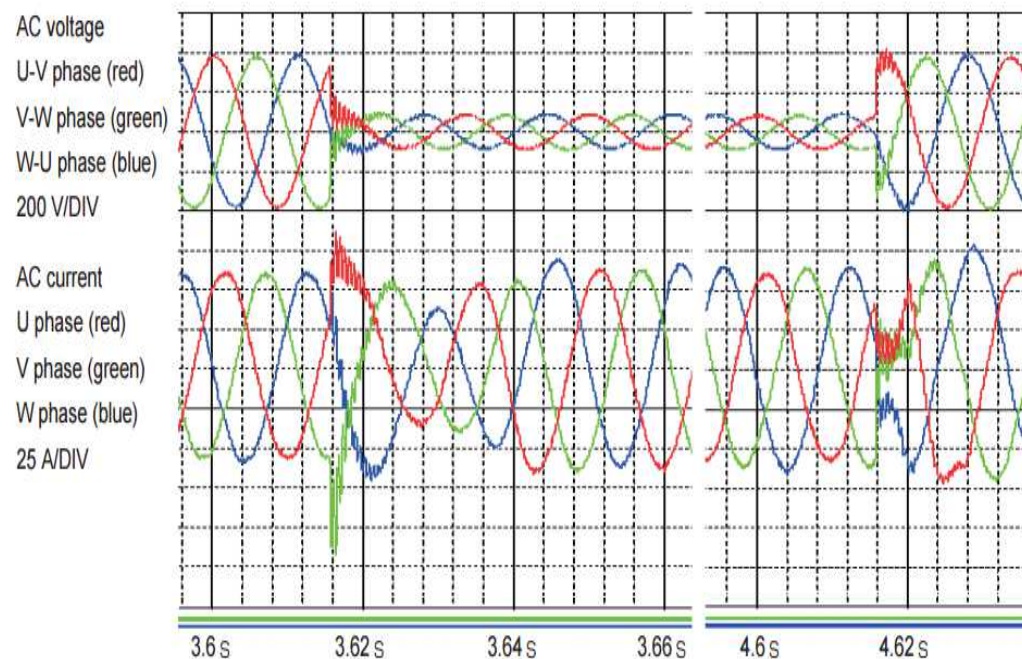
Должно быть обеспечено надежное функционирование ГО при снижении напряжения:

- длительная устойчивая работа объекта в диапазоне напряжений не менее +/-10% от номинального;
- устойчивая работа при кратковременных провалах напряжений (LVRT - Low Voltage Ride Through).
- на электростанциях (преимущественно на ТЭС) должна предусматриваться ЧДА - для предотвращения полного останова при недопустимом снижении частоты в энергосистеме.

В наиболее современных моделях оборудования объектов ВИЭ в системах автоматического управления преобразовательной частью 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 трехфазный ток в рабочем диапазоне для подавления колебаний электропитания в системе.



Стандарты LVRT по устойчивости при провалах напряжения



Оциллограммы напряжений при КЗ в районе СЭС и соответствующих токов инверторов с функцией FRT

Более подробно проблемы интеграции РГ (в т.ч. ВИЭ) в энергосистему рассмотрены в [8]

На текущий момент НТЦ ЕЭС по заданию Системного оператора выполняет работу "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". Учитывая международный опыт разработки и внедрения национальных сетевых кодексов (Grid Code), регламентирующих порядок включения РГ в сеть, основная часть требований в данной работе предъясняется к параллельной работе ВИЭ с энергосистемой.

Зарядная инфраструктура для электромобилей и накопители энергии

В августе 2016 г. в Дании запущен первый в мире полностью коммерческий комплекс из **10 зарядных станций (ЗС)** для электромобилей от сети по технологии **vehicle-to-grid (V2G)** общей мощностью 100 кВт, который стал следствием решений Парижской Конференции по климату в декабре 2015 года. Данный комплекс за счет применения двунаправленных преобразователей в ЗС поставляет в т.ч. услуги по обеспечению балансирования электросети путем частичной обратной закачки в неё заряда из АКБ электромобилей, повышая её стабильность, выравнивая графики нагрузки и позволяя в дальнейшем интегрировать ВИЭ в структуру генерации в соответствии с концепцией DER.

В РФ сеть зарядных станций несколько лет развивает МОЭСК и Россети, выполнена НИОКР на разработку ЗС с накопителем энергии, ведутся работы в области V2G. В 2015г. вышло Постановление Правительства РФ, согласно которому будет развиваться сеть ЗС на существующих топливных АЗС, расположенных на федеральных трассах, что вместе с поддержкой проектов ВИЭ позволит расширить РГ на всю территорию России, а также в перспективе внедрить технологию балансирования нагрузки электросетей на основе V2G.

В вопросе интеграции ЗС и ВИЭ ввиду большой территории России представляется наиболее целесообразным создание сети **автономных ЗС**, не привязанных к существующим электросетям и запитанных от комбинированных установок **СЭС+ВЭУ+СНЭ**, что наиболее полно отражает преимущества концепции DER. При размещении вдоль автотрасс такие установки позволят обеспечить функционирование как быстрых ЗС по стандартам CHAdeMO (до 50кВт DC) и CCS2 (50-150кВт DC), так и энергоэффективного придорожного освещения.

В условиях наличия слабых или изношенных сетей в удаленных населенных пунктах аналогичные комбинированные установки с накопителями и гибридными инверторами позволят разгрузить маломощные КТП 10/0,4кВ и питающие линии, обеспечить резервирование, поднять надежность и качество электроснабжения потребителей без существенных затрат на электросетевое строительство.

Локализация в РФ производства преобразовательной силовой электроники

Для обеспечения требуемого уровня локализации производства в РФ для проектов ДПМ ВИЭ российскими предприятиями уже освоены крупноузловая сборка и испытания солнечных инверторных станций как мегаваттного класса (Шнайдер Электрик, АББ, Гринмакс), так и стринговых (Микроника-Лисис). Разработаны и освоен выпуск модульных автономных и гибридных инверторов, МРРТ-контроллеров, ИБП, СНЭ и частотных преобразователей (Связь-инжиниринг, МикроАрт, НТЦ Приводная техника и др.), заявлены планы по локализации и идет освоение производства преобразовательной силовой электроники для ВЭС и СЭС различного масштаба (в т.ч. в рамках РРЭ) более десятком отечественных предприятий (НТЦ Приводная техника, Электронмаш и др.). Разработаны и выпускаются ЗС для электромобилей (Рязанский приборный завод), идет освоение производства на некоторых вышеупомянутых предприятиях.

ВЫВОДЫ

- внедрение РГ 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;
- при планировании размещения ВИЭ-генерации необходимо внимательно подходить к вопросам выбора площадки и параметров объекта РГ с учетом особенностей схем и состояния оборудования и режимов прилегающих сетей, перспектив изменения нагрузок в энергорайоне и их профиля, которые должны быть отражены при разработке схем выдачи мощности станций и ТУ на технологическое присоединение к электросетям, проектной документации и определении технических требований, в т.ч. к преобразовательному оборудованию;
- 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.



ВОПРОСЫ ?

Спасибо за внимание !

КРАМСКОЙ Ю.Г.

Научно-практическая конференция
«ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ
ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ
И РЕАЛИЗАЦИИ МЕЖДУНАРОДНЫХ ПРОЕКТОВ»

8 декабря 2016 года

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] СОСТОЯНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ 2016, ГЛОБАЛЬНЫЙ ОТЧЕТ, REN21
- [2] Автономные и гибридные инверторы и МРРТ-контроллеры. Материалы сайта www.invertor.ru
- [3] Yu.N. Kuchеров, D.N. Yarosh, Yu.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.
- [4] ГОСТ Р 55890—2013 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. ОДУ. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ И ПЕРЕТОКОВ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ. Нормы и требования
- [5] СТО 59012820.29.240.001-2011(с изм от 24/12/2015г) Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем.
- [6] Ботвинник.М.М. Асинхронизированная синхронная машина. М.: Госэнергоиздат, 1960
- [7] Асинхронизированные машины для электроэнергетики// Шакарян Ю.Г., Сокур П.В., Пинчук Н.Д., Антонюк О.В., Новожилов В.Ю.//Энергия единой сети. №4. 2016.
- [8] Нормативно-техническое регулирование интеграции источников распределенной генерации, включая ВИЭ, в энергосистему. Кучеров Ю.Н., Березовский П.К. (ОАО «СО ЕЭС») Илюшин П.В. (ЗАО «Техническая инспекция ЕЭС»), Веселов Ф.В. (ИНЭИ РАН). Материалы совместного заседания НТК НП «НТС ЕЭС», ПК-5/ТК016 «Электроэнергетика» г. Москва, 8 июля 2015 г.
- [9] Fault Current Contributions from Wind Plants. Prepared by the Joint Working Group. IEEE Power and Energy Society 2013
- [10] ГОСТ Р 51991-2002 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования.
- [11] Wind Power Plant Short Circuit Current Contribution for Different Fault and Wind Turbine Topologies. Preprint. V. Gevorgian and E. Muljadi. NREL
- [12] M. R. Banaei, Vahid Rezanejad Asl Bonab. Wind Turbine Control Based DFIG with Reduced Switches AC/AC Converter. IJRDET, April 2014