

АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦИИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В работе представлен краткий анализ вариантов конфигурации цепей преобразования энергии современных ветроэнергетических установок. Рассмотрены характерные типы генераторных систем для ВЭУ и проанализированы плюсы и минусы использования различных типов электрических машин в качестве генерирующих устройств ВЭУ. Определен вектор развития ВЭУ в части выбора типа генераторной системы. В статье описаны предлагаемые будущие системы генерации и перечислены их достоинства и недостатки по сравнению с используемыми в настоящее время генераторными системами.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, система генерации, генератор, редуктор.

Введение. Качество вырабатываемой электрической энергии на ветроэлектростанциях зависит от конструкции механической части ВЭУ, от совершенства систем автоматизации и от вида генератора, входящего в их состав. Для электроснабжения потребителей применяются синхронные и асинхронные генераторы. Синхронный генератор предназначен для выработки переменного тока фиксированной частоты и обеспечения электрической энергией объектов с реактивной нагрузкой до 65 %. Асинхронные генераторы используются для выработки и поддержания напряжения в сети с высокой точностью и в большинстве случаев хорошо работают на активную и активно-индуктивную нагрузку с реактивной мощностью до 30 % от номинала и ступенчатым регулированием.

Наиболее важной задачей при проектировании электрогенераторов является повышение мощности электропреобразователей без существенного увеличения их себестоимости и ухудшения массогабаритных показателей.

Распространенные генераторные системы. Четыре наиболее часто используемые генераторные системы, применяемые в ветровых турбинах, показаны на рис. 1 и обсуждаются ниже [1–5]. В табл. 1 перечислены 10 ведущих производителей ветряных турбин 2018 с уровнями мощности их продуктов [6–14] и используемыми ими системами генераторов.

Рассмотрим эти системы подробнее.

Асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором. В последние десятилетия прошлого века большинство производителей ветряных турбин в основном строили ветровые турбины с постоянной скоростью, мощность которых увеличивалась до ~ 1,5 МВт. Эта система с постоянной скоростью состоит из трехступенчатой коробки передач и асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором, непосредственно подключенным к мест-

ной энергосети. Эта система (рис. 2) также упоминается как датская концепция.

Выше номинальной скорости ветра мощность в основном ограничена с использованием классического принципа срыва потока: если скорость ветра увеличивается выше номинальной скорости ветра, коэффициент мощности уменьшается, так что мощность, создаваемая турбиной, остается примерно равной номинальной мощности. Иногда используется контроль и управление скоростью вращения вала ротора путём поворота лопастей вокруг своей оси и изменения их угла атаки за счёт ряда промежуточных фиксированных положений лопасти. Основное преимущество этой системы заключается в том, что она состоит из простых готовых компонентов и поэтому она дешёвая. Два варианта этой системы были использованы для преодоления некоторых ее недостатков:

1) асинхронный генератор со сменой полюсов имеет две обмотки статора с различным числом пар полюсов, так что турбина может работать с двумя постоянными скоростями для увеличения выхода энергии и уменьшения слышимого шума;

2) ветровая турбина с переменной скоростью вращения имеет асинхронный генератор с фазным ротором с электронным изменением сопротивления ротора. Это позволяет увеличить скорость и уменьшить механические нагрузки и проблемы с качеством электроэнергии. Эта система иногда упоминается как отдельная система генератора [4].

Асинхронный генератор двойного питания. После 1996 года многие производители ветряных турбин перешли на систему с переменной скоростью с асинхронным генератором двойного питания для ветровых турбин с уровнем мощности от 1,5 МВт. Эта система состоит из многоступенчатой коробки передач (редуктора), относительно недорогого стандартного асинхронного генератора двойного питания и частично номинального силового

Топ 10 производителей ветровых турбин на 2018 г.

Производитель	Концепт	Диаметр ротора	Диапазон мощностей
General Electronics (US)	DFIG DD PM	77 – 120 м 113 м	1,5 – 2,85 MBт 4,1 MBт
Vestas (Denmark)	DFIG GFC PM	80 – 100 м 112 – 164 м	1,8 – 3 MBт 1,8 – 8 MBт
Siemens (Germany/ Denmark)	GFC IG DD PM	82 – 120 м 101 – 154 м	2,3 – 3,6 MW 3 – 6 MW
Enercon (Germany)	DD EE	48 – 126 м	0,8 – 7,5 MBт
Suzlon (India)	CS DFIG	52 – 88 м 95 – 97 м	0,6 – 2,1 MBт 2,1 MBт
Gamesa (объединилась с Siemens)	DFIG GFC PM	52 – 114 м 128 м	0,85 – 2 MBт 4,5 MBт
Goldwind (China)	DD PM	70 – 109 м	1,5 – 2,5 MBт
Guodian United Power (China)	DFIG DD PM	77 – 100 м 100 м	1,5 – 3 MBт 3 MBт
Sinovel (China)	DFIG	60 – 113 м	1,5 – 5 MBт
MingYang (China)	DFIG GFC PM	77 – 83 м 92 – 108 м	1,5 MBт 2,5 – 3 MBт

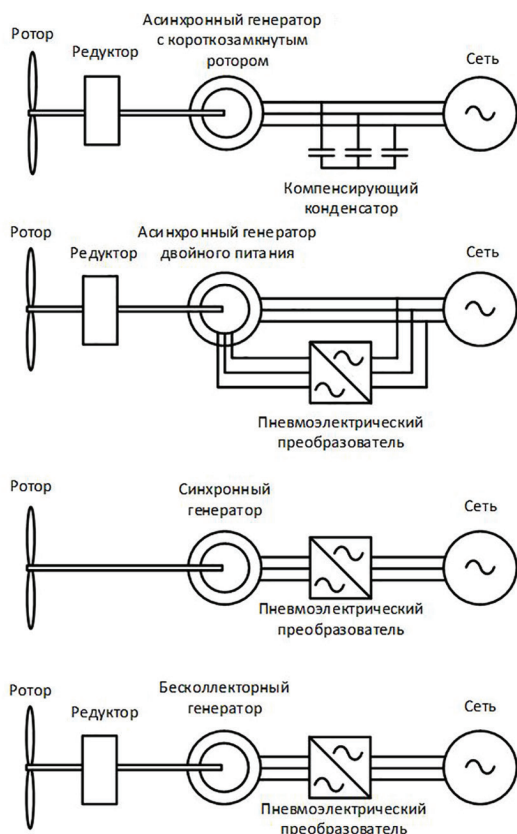


Рис. 1. Четыре часто используемые системы генерации [5]

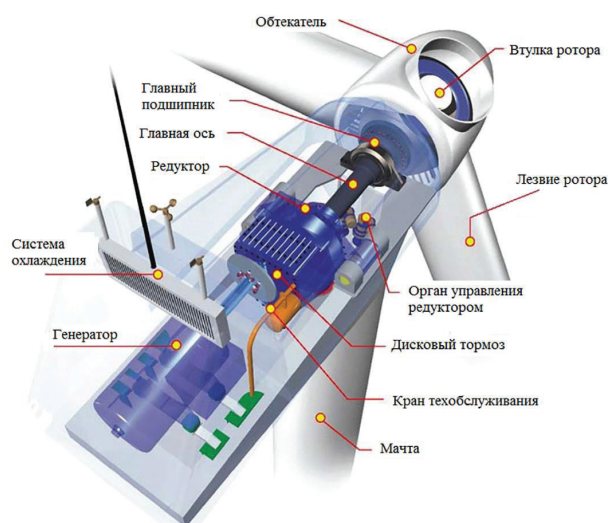


Рис. 2. Эскиз гондолы с коробкой передач, в данном случае ветровой турбины с постоянной скоростью NEG micon

электронного преобразователя, питающего обмотку ротора. Управление шагом винта ограничивает выходную мощность до номинальной мощности при скорости ветра выше номинальной.

Мощность преобразователя составляет ~ 25 % от номинальной мощности, что обеспечивает диапазон скоростей от, примерно, 60 % до 110 % от номинальной скорости. Этого достаточно для хорошего выхода энергии, поскольку относительная скорость несущего винта может быть оптимальной для большей части рабочего диапазона.

По сравнению с системой с постоянной скоростью, эта система обеспечивает более гибкое соответствие требованиям, предъявляемым к слы-

Примечание. CS — система с постоянной скоростью, с редуктором и асинхронным генератором, возможно с двумя скоростями расширенного скольжения; DFIG — система с изменяющейся скоростью, с редуктором и асинхронным генератором двойного питания и частично номинальным преобразователем; DD EE — система с изменяющейся скоростью, безредукторным синхронным генератором с электрической системой возбуждения с полным преобразователем; DD PM — система с изменяющейся скоростью, безредукторным генератором на постоянных магнитах с полным преобразователем; GFC PM — система с изменяющейся скоростью, с редуктором и генератором на постоянных магнитах с полным преобразователем; GFC IG — система с изменяющейся скоростью, с редуктором и асинхронным генератором с полным преобразователем.

шиму шуму, механическим нагрузкам, качеству мощности и выходу энергии. Важным недостатком этой системы явилось появление в правилах технической эксплуатации электрических станций и сетей: операторы энергосистемы установили ошибку для способности поддержания непрерывности электроснабжения при сбоях [15]. Это было невозможно при использовании стандартной системы асинхронного генератора двойного питания, и поэтому была проделана большая работа для обеспечения сквозного прохода через сеть [16–23]. Эта работа была настолько успешной, что после смены систем передачи и полного преобразователя в 2005 году снова вернулись к асинхронным генераторам двойного питания в 2012 году [3].

Бесщеточный генератор с редуктором и полным преобразователем. С 2005 года несколько крупных производителей разработали ветряные двигатели переменной скорости с редуктором, бесщеточным генератором и преобразователем для полной номинальной мощности. Управление шагом винта ограничивает выходную мощность до номинальной

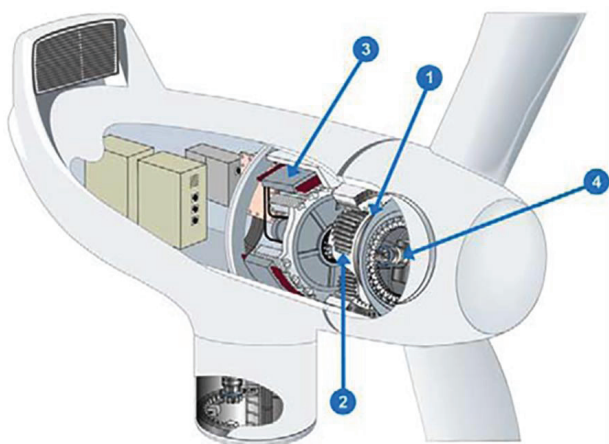


Рис. 3. Эскиз системы

мощности при скорости ветра выше номинальной. Эта система в основном используется для получения более качественных характеристик через сеть, чем асинхронный генератор двойного питания, и для предотвращения технического обслуживания и отказов щеток асинхронного генератора двойного питания. Однако полностью номинальный преобразователь имеет больше потерь, чем преобразователь с частичным номинальным коэффициентом, как в случае с асинхронным генератором двойного питания.

На рынке существует множество вариантов этой системы, потому что используются разные типы генераторов и разные редукторы. Некоторые производители используют генераторы на постоянных магнитах, но также используются асинхронные генераторы с короткозамкнутым ротором (табл. 1). Количество ступеней редуктора в этой системе может варьироваться от одного до трех. Меньшее количество ступеней редуктора подразумевает более крупный генератор, но результирующая система может быть более эффективной и надежной из-за отсутствия высокоскоростной ступени редуктора [24, 25]. Система, показанная на рис. 3, имеет одноступенчатую коробку передач и генератор на постоянных магнитах. Ротор соединен с силовым агрегатом через специальный трехрядный роликовый подшипник (1). Роликовый подшипник передает нагрузку ротора напрямую в основной корпус. Под (2) представлена одноступенчатая планетарная коробка передач. Тихоходный генератор на постоянных магнитах (3) производит электричество. Скорость вращения ротора контролируется независимым шаговым приводом (4).

Система с генератором с прямым приводом. С 1992 года также были производители ветряных турбин, использующих безредукторные генераторные системы с генераторами с прямым приводом, как показано на рис. 4. Генератор представляет собой синхронную машину. Для сетевого подключения необходим полностью номинальный силовой электронный преобразователь.

В девяностые годы генераторы с прямым приводом в основном имели электрическое возбуждение, потому что постоянные магниты были слишком дорогими. Когда цена постоянных магнитов уменьшилась, фокус переместился на генераторы с постоянными магнитами. Высокие цены на магниты

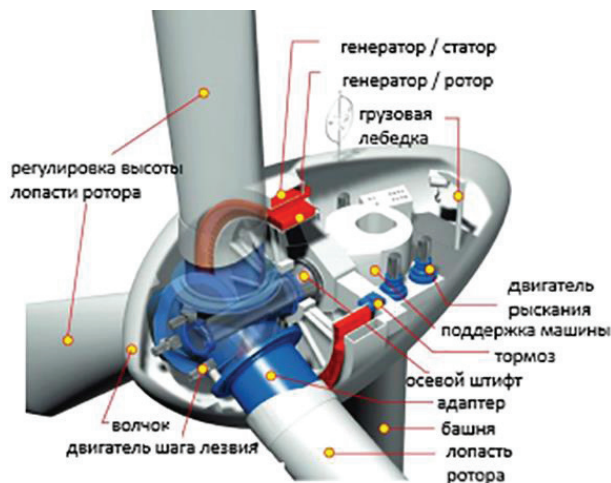


Рис. 4. Эскиз безремонтной гондолы, в данном случае ветряной турбины Enercon E-66 DD

в 2011 году вновь увеличили интерес к альтернативам — постоянным магнитам. Долгое время Enercon был единственным крупным успешным производителем прямых приводов, хотя было ещё несколько небольших производителей. Однако и другие крупные производители ветряных турбин начали выпускать ветровые турбины с прямым приводом (табл. 1). Основной причиной использования систем прямого привода является повышение надежности за счет предотвращения технического обслуживания и отказов редуктора и сокращения количества деталей турбины. Тем не менее еще предстоит доказать, что надежность прямого привода действительно лучше, чем надежность редукторных систем [26].

Основными недостатками безредукторной системы генерации являются то, что низкоскоростной высокомоментный генератор (3) является крупным, тяжелым и дорогостоящим, а низкоскоростные генераторы менее эффективны, чем генераторы с высокой скоростью. Таким образом, много исследований было направлено на оптимизацию этих машин. Электромагнитные и термические ограничения генераторов радиального потока с железным сердечником, применяемые в промышленности, описаны в [27–29]. Для снижения стоимости производства генераторов прямого привода были предложены концентрированные обмотки с зубчатой намоткой [30]. Дополнительные потери из-за дополнительных пространственных гармоник являются предметом опасений.

Система с синхронным генератором на постоянных магнитах. Появлению в модельном ряду фирмы «Vestas» ВЭУ с новой конфигурацией цепи преобразования энергии послужили такие предпосылки, как относительно более высокий по сравнению с асинхронными генераторами КПД синхронных генераторов; массовое появление на рынке мощных постоянных магнитов (Ne-Fe-B), позволяющих осуществить простую систему возбуждения машины мегаваттного класса и успешное развитие полупроводниковой преобразовательной техники, подарившее энергетикам мощные и компактные частотные преобразователи.

На рис. 1. показана структура энергопреобразующей цепи ВЭУ, которая может применяться при любой ориентации оси вращения ветроколеса с горизонтальным расположением оси или ротора

с вертикальной осью. Установка оснащена синхронным генератором с возбуждением от постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов.

Вся энергия, вырабатываемая синхронными генераторами на постоянных магнитах, преобразуется в энергию постоянного тока, затем — переменного тока постоянной частоты. При этом синхронный генератор начинает вырабатывать электрическую энергию сразу после начала вращения ротора и не зависит от частоты вращения ротора вплоть до номинальной частоты вращения генератора. При увеличении частоты вращения генератора до величин, значительно превосходящих номинальные значения, производится смена направления лопастей ротора с целью ограничения развиваемой электрической мощности и обеспечения сохранности генератора.

Однако, с точки зрения использования возможностей первичного преобразователя энергии, схема более удачна. Помимо этого, КПД генератора электроэнергии выше по сравнению с асинхронными машинами [1].

Будущее генераторных систем. В этой части работы рассматриваются элементы возможных будущих систем генераторов, включая гидравлические трансмиссии, альтернативные генераторы прямого привода, бесщеточные асинхронные генераторы двойного питания, генераторы с прямым приводом и сверхпроводящими проводами и силовые электронные преобразователи. Для большинства этих систем мы пока не можем предсказать, приведут ли они к стоимости энергии ниже, чем стоимость используемых в настоящее время систем генераторов. Поэтому в работе описываются предлагаемые будущие системы генераторов и перечислены критические преимущества и недостатки по сравнению с используемыми в настоящее время системами генераторов.

Механически бесступенчатая трансмиссия. Бесступенчатая трансмиссия позволяет использовать напрямую синхронные машины с электрическим возбуждением, что позволяет избежать силовых электронных преобразователей. Наиболее часто используемая механическая бесступенчатая трансмиссия основана на коробке передач с двумя выходными валами [31, 32]. Основной выходной вал соединен с генератором постоянной скорости. Скорость другого выходного вала управляется с помощью привода с переменной скоростью таким образом, чтобы скорость основного вала поддерживалась постоянной. В варианте этой системы [33] вал переменной скорости механически соединен с валом постоянной скорости с бесступенчатой передачей скорости на основе металлической ленты. Чтобы добиться разумного изменения скорости, уровень мощности системы с переменной скоростью должен быть значительным, сравнимым с системой асинхронного генератора двойного питания. Кроме того, эта система увеличивает сложность коробки передач. Поэтому мы пока не видим убедительных преимуществ по сравнению с системой асинхронного генератора двойного питания.

Гидравлические системы передачи. Гидравлические системы передачи можно разделить на гидродинамические и гидростатические передачи [34, 35]. WinDrive (Voith) основан на гидродинамической передаче или гидротрансформаторе, где турбины дают энергию и потребляют энергию из потока масла. Это работает только на высоких скоростях, поэтому эта система нуждается в редук-

торе. Приводные валы Wikov, ChapDrive и Artemis (Mitsubishi) основаны на гидростатических трансмиссиях или насосах с принудительным вытеснением, где цилиндры вытесняют масло под давлением. Система Wikov состоит из комбинации редуктора и гидравлической системы, в то время как в системах ChapDrive и Artemis редуктора нет. Гидростатические трансмиссии имеют большие преимущества, что они значительно легче и дешевле, чем коробки передач [36]. Кроме того, гидравлические системы передачи обычно используются в качестве бесступенчатых передач, поэтому может использоваться синхронный генератор, подключенный к сети напрямую, что позволяет избежать использования силовых электронных преобразователей. Однако гидравлические трансмиссии еще не стали коммерчески успешными в ветровых турбинах. Причины в том, что эффективность ниже, чем эффективность коробки передач, и что существует риск загрязнения маслом, если что-то пойдет не так. Поскольку эти системы еще не использовались в разумных пределах в ветровых турбинах, нет данных о надежности этих систем.

Альтернативы генераторам прямого привода. Уменьшение стоимости, размеров и веса генераторов прямого привода для ветряных турбин является проблемой, особенно при высоких уровнях мощности, поскольку уровень крутящего момента увеличивается более чем пропорционально уровню мощности. Для увеличения напряжения сдвига было предложено использование генераторов на постоянных магнитах с поперечным потоком [37–41]. Однако до сих пор результирующее напряжение сдвига генераторов прямого привода в этом устройстве не превышало получаемого из обычных машин с радиальным потоком из-за относительно большого воздушного зазора. Другими недостатками этих машин являются низкий коэффициент мощности и сложная конструкция из-за трехмерных линий магнитного потока. Если вес генераторов прямого привода разделен на электромагнитно-активный и конструкционный материал, то наиболее существенным является конструкционный материал. Поэтому были предложены различные способы уменьшения количества конструкционного материала. Идея использовать генераторы большого диаметра с воздушным сердечником для снятия силы притяжения между статором и ротором была принята некоторыми компаниями, например, Sway Turbine и Boulder Wind Power. В сравнении с аналогичными разработками, компания Goliath использует генератор большого диаметра, но этот генератор, похоже, имеет обмотку воздушного зазора между статором и сердечником ротора, как описано в [42]. Такие конструкции позволяют использовать менее электромагнитно активный и конструкционный материал. Однако защита обмоток и магнитов от агрессивной среды с влажностью и солью является проблемой. В [28] предлагается уменьшить расстояние между подшипниками и расположение электромагнитных сил с помощью гибридных магнитных подшипников или подшипников скольжения. Опять же это позволяет использовать более легкие конструкции, но подшипники становятся более сложными.

Бесщеточный асинхронный генератор двойного питания. В [43–46] было предложено использовать бесщеточный асинхронный генератор двойного питания в качестве генератора для использования в ветровых турбинах. Бесщеточный асинхронный генератор двойного питания имеет две обмотки

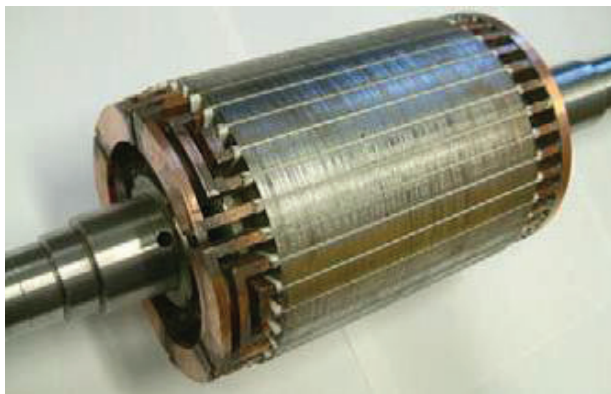


Рис. 5. Ротор бесщеточного асинхронного генератора двойного питания

статора, одна из которых соединена с сетью (так называемая силовая обмотка), а другая (так называемая управляющая обмотка) подается через преобразователь так же, как в асинхронном генераторе двойного питания. Машина имеет два основных поля, связанных с двумя обмотками статора, разных полюсов. Ротор имеет короткозамкнутую обмотку, состоящую из так называемых вложенных петель, как показано на рис. 5.

Машина работает в синхронном режиме с фиксированным соотношением между частотой вращения вала и двумя частотами статора, снова как в асинхронном генераторе двойного питания. Существуют ограничения на допустимые количество полюсов двух главных полей с наивысшей доступной естественной скоростью (соответствующей синхронной скорости асинхронного генератора двойного питания) с двухполюсной 6-контактной комбинацией, составляющей 750 об/мин в системе с частотой 50 Гц. Поэтому бесщеточный асинхронный генератор двойного питания рассматривается как естественная часть привода средней скорости с естественной скоростью порядка 300 об/мин.

Бесщеточный асинхронный генератор двойного питания, как и асинхронный генератор двойного питания, имеет преимущества недорогой конструкции в том, что не используются постоянные магниты и требуется использовать только частично-номинальный преобразователь. Одновременно с этим отсутствие зубчатой шестерни устраняет один из основных режимов отказа асинхронных генераторов двойного питания. Поэтому использование бесщеточного асинхронного генератора двойного питания является недорогим, но надежным вариантом [43].

Генератор с прямым приводом и сверхпроводящими проводами. Идею генератора с прямым приводом и сверхпроводящими проводами представила лаборатория Advanced Magnet, расположенная в городе Палм-Бэй, штат Флорида, и разработала устройство в сотрудничестве с Аргоннской национальной лабораторией для больших ветровых турбин. Генератор с прямым приводом и сверхпроводящими проводами позволит значительно сократить стоимость ветровой энергии.

Использование прямого привода в генераторе исключает необходимость установки коробки передач. Тем самым снижается вес генератора, уменьшается количество движущихся частей и снижаются эксплуатационные расходы. Ветровая турбина работает как вентилятор, но в обратном направ-

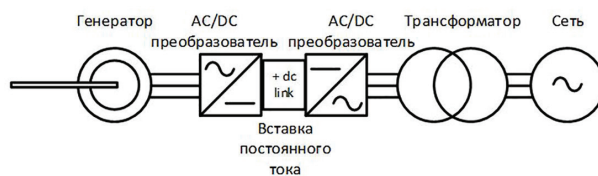


Рис. 6. Обзор компонентов преобразования мощности

лении: вместо того чтобы использовать электроэнергию для создания ветра, она использует ветер для вращения лопастей и генерирования электроэнергии. Прямой привод обеспечивает передачу полученного электричества в сеть.

В проекте лаборатория Advanced Magnet основной упор сделала на эффективном использовании сверхпроводящих проводов, которые имеют практически нулевое электрическое сопротивление. Во-первых, это позволит создать линию электропередачи с минимальными потерями электричества, а во-вторых, это позволит уменьшить массу и габариты генератора ветровой турбины. Но, поскольку сверхпроводники работают при криогенных температурах, лаборатория также занимается разработкой эффективной системы охлаждения для установки. Использование турбины с генератором с прямым приводом и сверхпроводящими проводами рассматривается как в промышленности [47, 48], так и в научных кругах [49–51].

Силовые электронные преобразователи. В системах с переменной частотой вращения ветрогенераторов с частично или полностью номинальным преобразователем используется, в основном, стандартный инвертор источника постоянного напряжения как для систем асинхронного генератора двойного питания, так и для систем с полным преобразователем [52, 53].

Эта система нуждается в более чем одной ступени преобразования, чтобы преобразовать частоту и уровень напряжения, что делает ее совместимой с напряжением сети, как показано на рис. 6. Возрастающая номинальная мощность сопровождается необходимостью увеличения напряжения на линии постоянного тока между AC/DC преобразователями. Характерным значением будет 5 кВ для напряжения сети первичной стороны 3,3 кВ. Для обработки этих напряжений необходимы многоуровневые преобразователи.

Дальнейшая эволюция ветроэнергетических систем будет в значительной степени обусловлена соображениями надежности, что подразумевает, что предпочтение будут иметь зрелые многоуровневые преобразователи, такие как трехуровневая топология с затуханием нейтральной точки. Выбор подходящих топологий преобразователей и дальнейшая разработка силовых электронных устройств и пакетов устройств в значительной степени будут способствовать лучшему пониманию механизмов отказа и требований к циклическому циклу. В частности, преобразователь на стороне генератора плохо влияет на поведение температурного цикла и нелинейные факторы ветровой нагрузки, такие как турбулентность и порывы [54]. В системах с асинхронным генератором двойного питания и генератором с прямым приводом и сверхпроводящими проводами ситуация усугубляется, потому что силовые электронные преобразователи обрабатывают частоты переменного тока, которые

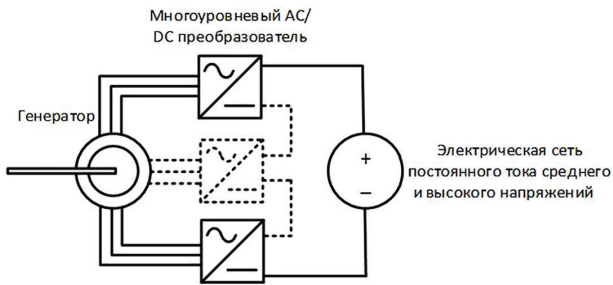


Рис. 7. Модульная многоуровневая система преобразования

могут быть порядка или ниже 2 Гц, что сопоставимо с температурными временными константами пакетов устройств.

Рассмотрим два типа многоуровневых преобразователей.

1. Модульные отказоустойчивые конверсионные системы: конвертер высокой мощности нуждается в большом количестве полупроводниковых устройств и является сложным. В ряде исследований были исследованы конструкции без трансформаторов, основанные на модульной многоуровневой концепции преобразования высокого напряжения [55]. Промежуточное звено постоянного тока устраняется и предлагается непосредственно генерировать выходное напряжение переменного или постоянного тока в диапазоне 10–100 кВ. Привлекательная особенность заключается в том, что в оффшорных ветровых парках ветряные турбины могут быть подключены непосредственно к сети.

На рис. 7. показана схема такой модульной многоуровневой системы. Генератор делится на несколько сегментов, каждый из которых ведет себя как трехфазный или однофазный генератор. Сегменты имеют обмотки статора, которые электрически изолированы от других сегментов обмотки и сердечника статора. Активный модуль выпрямителя преобразует переменный ток в постоянный ток, и блоки последовательно соединены.

Отказоустойчивость должна быть достигнута как в сегменте машины, так и в силовой электро-

нике. Электрически модуль можно обойти, но также необходимо убедиться в том, что неисправность обмотки не вызывает перегрева или создает нежелательный разрывный момент. Преобразователь силовой электроники и конструкция сегмента машины должны включать в себя режим отказа, высоковольтные и теплотехнические решения.

2. Система генератора без трансформатора постоянного тока: многоуровневая модульная система генератор-преобразователь предъявляет высокие требования к высоковольтной изоляции обмоток машины, особенно изоляции заземляющей стены. Первоначальные исследования представлены в [56]. Удовлетворение требований к изоляции большого синфазного напряжения и емкостных эффектов связи из-за переключения электрической скорости нарастания напряжения может быть сложной задачей для сетей высокого напряжения. Кроме того, крутящий момент, создаваемый генератором, будет снижен из-за пониженного коэффициента заполнения меди в слотах из-за объема изоляционного материала, который необходимо добавить. На тепловое сопротивление обмоток также будет влиять изоляционный материал, снижающий плотность тока в проводниках.

На основе характерных напряжений, используемых в приводах с высокой мощностью, практическое напряжение постоянного тока 1–10 кВ должно быть реалистичным с использованием современной технологии. Затем напряжение повышается до средних и высоких напряжений постоянного тока с помощью повышающего преобразователя постоянного тока, как показано на схеме системы на рис. 8.

Предлагается использовать модульную многоуровневую схему преобразователя постоянного тока, описанную в [57], поскольку она является бестрансформаторной и характеризуется отказоустойчивостью за счет функции избыточных модулей с другими модульными многоуровневыми преобразователями. Уникальной особенностью этого преобразователя является вторичный контур питания, который переключает мощность между модулями, используя принцип, согласно которому мощность на разных частотах ортогональна друг другу.

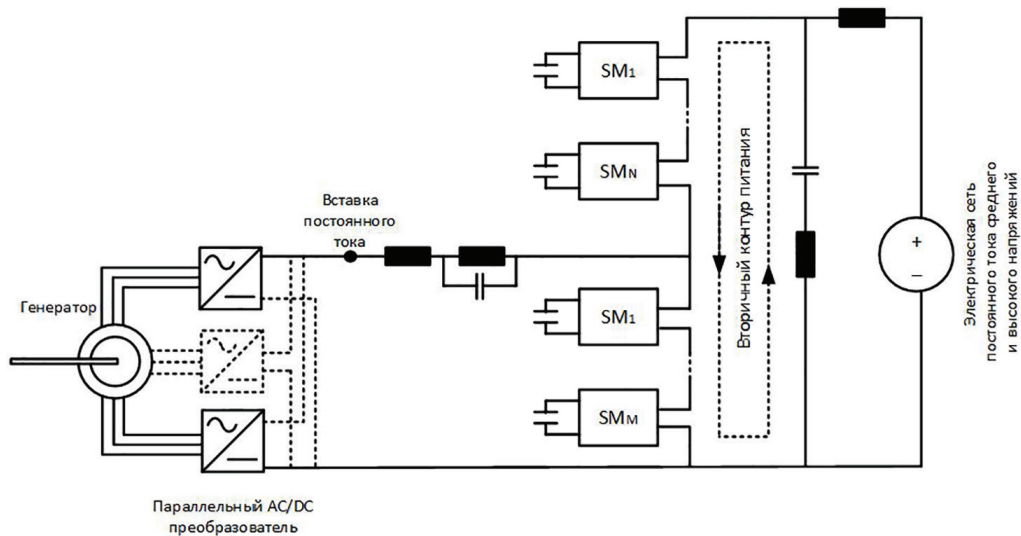


Рис. 8. Трансформаторный модульный многоуровневый преобразователь с постоянным током

Результаты и обсуждения. Не существует конвергенции в отношении одной наилучшей системы ветрогенераторов, но вместо этого растет разнообразие систем ветрогенераторов. Ожидается, что три применяемые в настоящее время системы с переменной скоростью всё так же будут актуальны в будущем. Гидравлические трансмиссии обеспечивают бесступенчатую трансмиссию и значительно легче редукторов, но их эффективность ниже. Бесщеточный асинхронный генератор двойного питания представляет собой генератор средней скорости без щеток и с улучшенными характеристиками поддержания генераторного режима при провале напряжения сети по сравнению с асинхронным генератором двойного питания. Кроме того, генератор с прямым приводом и сверхпроводящими проводами может быть меньше и легче, чем обычные генераторы прямого привода, но как стоимость, так и надежность требуют экспериментальной демонстрации. В силовой электронике наблюдается тенденция к надежной модульной многоуровневой топологии.

Библиографический список

1. Беляков П. Ю., Панов Р. М. Анализ эффективности современных цепей преобразования энергии в ветроэлектрических установках большой мощности // *Электротехнические комплексы и системы управления*. 2011. № 4. С. 27–34.
2. Liserre M., Cardenas R., Molinas M. [et al.]. Overview of multi-MW wind turbines and wind parks // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011. Vol. 58. P. 1081–1095. DOI: 10.1109/TIE.2010.2103910.
3. De Vries E. Wind turbine drive systems: a commercial overview // *Electrical Drives for Direct Drive Renewable Energy Systems*. 2013. P. 139–157. DOI: 10.1533/9780857097491.2.139.
4. Hansen A. D., Iov F., Blaabjerg F. Review of contemporary wind turbine concepts and their market penetration // *Wind Engineering*. 2004. Vol. 28. P. 247–263. DOI: 10.1260/0309524041590099.
5. Polinder H. Overview of and trends in wind turbine generator systems // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. P. 1–8. DOI: 10.1109/PES.2011.6039342.
6. GE Renewable Energy. URL: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/turbines> (дата обращения: 14.09.2018).
7. Vestas. URL: <http://www.vestas.com> (дата обращения: 14.09.2018).
8. Siemens Gamesa Renewable Energy. URL: <https://www.siemensgamesa.com/en-int> (дата обращения: 18.09.2018).
9. ENERCON GmbH. URL: <http://www.enercon.de> (дата обращения: 20.09.2018).
10. Suzlon Energy Limited. URL: <http://www.suzlon.com> (дата обращения: 24.09.2018).
11. Goldwind. URL: <http://www.goldwindglobal.com> (дата обращения: 27.09.2018).
12. Guodian United Power Technology Co., Ltd. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/manufacturers/164-united-power> (дата обращения: 30.09.2018).
13. Sinovel Wind Group Co., Ltd. URL: <http://www.sinovel.com> (дата обращения: 30.09.2018).
14. Ming Yang Smart Energy Group, Ltd. URL: <http://www.mywind.com.cn/English/index.aspx> (дата обращения: 30.09.2018).
15. Tsili M., Papathanassiou S. A review of grid code technical requirements for wind farms // *IET Renewable power generation*. 2009. Vol. 3 (3). P. 308–332. DOI: 10.1049/iet-rpg.2008.0070.
16. Chen Z., Guerrero J. M., Blaabjerg F. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines // *IEEE Transactions on power electronics*. 2009. Vol. 24 (8). P. 1859–1875. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2017082.
17. Peña R., Cardenas R., Asher G. Overview of control systems for the operation of DFIGs in wind energy applications // *IECON 2013 — 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vienna. 2013. Vol. 60. P. 2776–2798. DOI: 10.1109/IECON.2013.6699116.
18. Morren J., De Haan S. W. H. Ride-through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip // *IEEE Transactions on energy conversion*. 2005. Vol. 20. P. 435–441. DOI: 10.1109/TEC.2005.845526.
19. Wessels C., Gebhardt F., Fuchs F. W. Fault ride-through of a DFIG wind turbine using a dynamic voltage restorer during symmetrical and asymmetrical grid faults // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2011. Vol. 26 (3). P. 807–815. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2099133.
20. Hansen A. D., Michalke G. Fault ride-through capability of DFIG wind turbines // *Renewable Energy*. 2007. Vol. 32 (9). P. 1594–1610. DOI: 10.1016/j.renene.2006.10.008.
21. Meegahapola L. G., Littler T., Flynn D. Decoupled-DFIG fault ride-through strategy for enhanced stability performance during grid faults // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2010. Vol. 1 (3). P. 152–162. DOI: 10.1109/TSTE.2010.2058133.
22. Котов А. А., Неустроев Н. И. Применение генератора двойного питания для ветроэнергетических установок малой, средней и большой мощности // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Энергетика. 2017. № 4. С. 80–89. DOI: 10.14529/power170409.
23. Шайбеков А. Ф., Рогинская Л. Э. Основные характеристики асинхронизированного синхронного генератора на базе машины двойного питания // *Электротехнические комплексы и системы: сб. тр. конф.* 2015. С. 112–117.
24. Polinder H., Van der Pijl F. F. A., De Vilderet G.-J. [et al.]. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2006. Vol. 21 (3). P. 725–733. DOI: 10.1109/TEC.2006.875476.
25. Li H., Chen Z., Polinder H. Optimization of multibrid permanent-magnet wind generator systems // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2009. Vol. 24 (1). P. 82–92. DOI: 10.1109/TEC.2008.2005279.
26. Arabian-Hoseynabadi H., Tavner P. J., Oraee H. Reliability comparison of direct-drive and geared-drive wind turbine concepts // *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*. 2010. Vol. 13 (1). P. 62–73. DOI: 10.1002/we.357.
27. Semken R. S. [et al.]. Direct-drive permanent magnet generators for high-power wind turbines: Benefits and limiting factors // *IET Renewable Power Generation*. 2012. Vol. 6 (1). P. 1–8. DOI: 10.1049/iet-rpg.2010.0191.
28. Mueller M., Zavvos A. Electrical generators for direct drive systems: a technology overview // *Electrical Drives for Direct Drive Renewable Energy Systems*. 2013. P. 3–29. DOI: 10.1533/9780857097491.1.3.
29. McDonald A., Mueller M., Zavvos A. Electrical, thermal and structural generator design and systems integration for direct drive renewable energy systems // *Electrical Drives for Direct Drive Renewable Energy Systems*. 2013. P. 51–79. DOI: 10.1533/9780857097491.1.51.
30. Brisset S., Vizireanu D., Brochet P. Design and optimization of a nine-phase axial-flux PM synchronous generator with concentrated winding for direct-drive wind turbine // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2008. Vol. 44 (3). P. 707–715. DOI: 10.1109/TIA.2008.921379.
31. Rossi C., Corbelli P., Grandi G. W-CVT continuously variable transmission for wind energy conversion system // *2009 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications*, Lincoln, NE. 2009. P. 1–10. DOI: 10.1109/PEMWA.2009.5208399.
32. Höhn B. R. Future transmissions for wind turbines // *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications. 2011.

Vol. 86. P. 18–25. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.86.18>.

33. Zhu W. D., Wang X. F. Design, Modeling and Simulation of a Geared Infinitely Variable Transmission // *Journal of Mechanical Design*. 2014. Vol. 136 (7). P. 071011–071011-9. DOI: 10.1115/1.4026950.

34. Ragheb A., Ragheb M. Wind turbine gearbox technologies // 2010 1st International Nuclear and Renewable Energy Conference, INREC'10. 2010. P. 1–8. DOI: 10.1109/INREC.2010.5462549.

35. Skaare B., Hörnsten B., Nielsen F. G. Modeling, simulation and control of a wind turbine with a hydraulic transmission system // *Wind Energy*. 2013. Vol. 16 (8). P. 1259–1276. DOI:10.1002/we.1552.

36. Diepeveen N. F. B. On the application of fluid power transmission in offshore wind turbines. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2013.

37. Arshad W. M., Backstrom T., Sadarangani C. Analytical design and analysis procedure for a transverse flux machine // IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat. No.01EX485), Cambridge, MA, USA. P. 115–121. DOI: 10.1109/IEMDC.2001.939284.

38. SvechKarenko D., Cosic D., Soulardet A. [et al.]. Transverse flux machines for sustainable development-road transportation and power generation // *Power Electronics and Drive Systems, 2007. PEDS'07. 7th International Conference on*. 2007. P. 1108–1114. DOI: 10.1109/PEDS.2007.4487843.

39. Zavvos A., Bang D., McDonald A. S. [et al.]. Structural analysis and optimisation of transverse flux permanent magnet machines for 5 and 10 MW direct drive wind turbines // *Wind Energy*. 2012. Vol. 15. P. 19–43. DOI:10.1002/we.543.

40. Олейников А. М., Канов Л. Н., Матвеев Ю. В. [и др.]. Математическая модель автономной безредукторной ветроэлектрической установки на генераторе с постоянными магнитами // *Электротехника и электроэнергетика*. 2010. № 2. С. 62–67.

41. Татевосян А. А., Огорелков Б. И., Татевосян А. С. Расчет индуктированной ЭДС в витке при относительном движении постоянного магнита с различной формой поперечного сечения // *Омский научный вестник*. 2014. № 3 (133). С. 179–183.

42. Spooner E., Gordon P., Bumby J. R. [et al.]. Lightweight ironless-stator PM generators for direct-drive wind turbines // *IEE Proceedings-Electric Power Applications*. 2005. Vol. 152 (1). P. 17–26. DOI: 10.1049/ip-epa:20041084.

43. McMahon R. A. [et al.]. Performance of BDFM as generator and motor // *IEE Proceedings-Electric Power Applications*. 2006. Vol. 153 (2). P. 289–299. DOI: 10.1049/ip-epa:20050289.

44. Brune C., Spe R., Wallace A. K. Experimental evaluation of a variable-speed, doubly-fed wind-power generation system // *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting*. 1993. P. 480–487. DOI: 10.1109/28.293713.

45. Abdi E., Wang X., Shao S. [et al.]. Performance characterisation of brushless doubly-fed generator // 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Edmonton, AB. 2008. P. 1–6. DOI: 10.1109/08IAS.2008.76.

46. Carlson R., Voltolini H., Runcos F. [et al.]. Performance analysis with power factor compensation of a 75 kw brushless doubly fed induction generator prototype // 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Antalya. 2007. Vol. 2. P. 1502–1507. DOI: 10.1109/IEMDC.2007.383650.

47. Lewis C., Muller J. A direct drive wind turbine HTS generator // 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL. 2007. P. 1–8. DOI: 10.1109/PES.2007.386069.

48. Snitchler G., Gamble B., King C. [et al.]. 10 MW class superconductor wind turbine generators // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011. Vol. 21 (3). P. 1089–1092. DOI: 10.1109/TASC.2010.2100341.

49. Abrahamsen A. B., Gamble B., King C. [et al.]. Feasibility study of 5 MW superconducting wind turbine generator // *Physica C: Superconductivity and its applications*. 2011. Vol. 471 (21-21). P. 1464–1469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2011.05.217>.

50. Jensen B. B., Mijatovic N., Abrahamsen A. B. Development of superconducting wind turbine generators // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2013. Vol. 5. P. 1–12.

51. Keysan O. Application of high-temperature superconducting machines to direct drive renewable energy systems // *Electrical Drives for Direct Drive Renewable Energy Systems*. 2013. P. 219–252. DOI: 10.1533/9780857097491.2.219.

52. Chen Z. An overview of power electronic converter technology for renewable energy systems // *Electrical Drives for Direct Drive Renewable Energy Systems*. 2013. P. 80–105. DOI:10.1533/9780857097491.1.80.

53. Blaabjerg F., Liserre M., Ma K. Power electronics converters for wind turbine systems // *IEEE Transactions on industry applications*. 2012. Vol. 48. P. 708–719. DOI: 10.1109/ECCE.2011.6063781.

54. Isidoril A., Rossi F. M., Blaabjerg F. [et al.]. Thermal loading and reliability of 10-MW multilevel wind power converter at different wind roughness classes // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2014. Vol. 50 (1). P. 484–494. DOI: 10.1109/TIA.2013.2269311.

55. Ng C. H., Parker M. A., Ran L. [et al.]. A multilevel modular converter for a large, light weight wind turbine generator // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2008. Vol. 23 (3). P. 1062–1074. DOI: 10.1109/TPEL.2008.921191.

56. Szykiel M. Overview of power converter designs feasible for high voltage transformer-less wind turbine // 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Gdansk, 2011. P. 1420–1425. DOI: 10.1109/ISIE.2011.5984368.

57. Ferreira J. A. The multilevel modular DC converter // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2013. Vol. 28 (10). P. 4460–4465. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2237413.

БУБЕНЧИКОВ Антон Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 4357-5273

AuthorID (РИНЦ): 512777

ORCID: 0000-0002-2923-1123

AuthorID (SCOPUS): 57188871772

ResearcherID: D-7850-2014

Адрес для переписки: privetomsk@mail.ru

БУБЕНЧИКОВА Татьяна Валерьевна, аспирантка кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

AuthorID (SCOPUS): 57190581588

Адрес для переписки: antech-energo@mail.ru

ШЕПЕЛЕВА Елена Юрьевна, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 2198-3042

AuthorID (РИНЦ): 821672

ORCID: 0000-0003-4908-560X

Адрес для переписки: elena.arta2013@yandex.ru

Для цитирования

Бубенчиков А. А., Бубенчикова Т. В., Шепелева Е. Ю. Анализ зарубежного опыта исследования систем генерации ветроэнергетических установок // *Омский научный вестник*. 2018. № 6 (162). С. 142–149. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-142-149.

Статья поступила в редакцию 26.10.2018 г.

© А. А. Бубенчиков, Т. В. Бубенчикова, Е. Ю. Шепелева