

Лекция 4.4

Электрические схемы ветроэнергетических установок

Ветроэнергетика в России получила ощутимый импульс развития благодаря государственной поддержке, выраженной в создании механизмов продажи мощности генерирующих объектов на основе ВИЭ по договорам поставки мощности на оптовый рынок (ДПМ ВИЭ). В период с 2021 по 2024 годы в России запланирован ввод 1,7 ГВт установленной мощности ВЭС, что на 45 % превышает план ввода солнечных электростанций за тот же период. На втором этапе программы ДПМ ВИЭ 2.0, реализуемой с 2025 по 2035, планируется ввод еще 10 ГВт установленной солнечной и ветряной генерирующей мощности в соотношении 35% к 65%. Устойчивой тенденцией развития мировой ветроэнергетики является рост установленной генерирующей мощности электростанций и рост единичной мощности ветроэнергетических установок. По состоянию на 2020 год наибольшая мощность серийно выпускаемой ветроэнергетической установки достигает 5,8 МВт для наземного размещения и 10 МВт для размещения в прибрежной зоне. Увеличение мощности ветрогенераторов находит отражение в конструкции ветрогенераторов, схемах построения электрической части станций, применяемых классах напряжения коллекторной сети и схемах выдачи мощности. Широко внедряют преобразовательные установки – конверторы, обеспечивающие регулирование частоты и реактивной мощности на выводах ВЭУ. С ростом установленной мощности возрастает роль ВЭС в электроэнергетической системе. Крупные ВЭС участвуют в первичном регулировании частоты и мощности, демпфируют провалы напряжения, вызванные короткими замыканиями и набросами нагрузки. Характерной особенностью ВЭС является колебания вырабатываемой мощности из-за изменений скорости ветра. График выработки непостоянен и не поддается строгому регулированию. Простой ветрогенератора из-за безветренной погоды или работа с частичной загрузкой снижает коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) и ухудшает технико-экономические показатели станции. Тем не менее, даже внезапные сбросы генерирующей мощности в течение нескольких минут и даже часов являются расчетными возмущениями и не должны приводить к ограничению электроснабжения потребителей. С учетом этого, при проектировании схем электрических соединений ВЭС зачастую не используют резервирования трансформаторов и линий электропередач в схеме выдачи мощности. В соответствии с нормативными документами допускается выдача мощности ВЭС по одной линии электропередачи классом напряжения 110 кВ и ниже. Считается, что даже в таком случае надежность ВЭС, оцениваемая по

значению коэффициента готовности (availability factor), может соответствовать требуемому уровню. Коэффициентом готовности называют долю времени от проектного срока эксплуатации, в течение которого ВЭУ находятся в нормальном режиме работы. Современные ВЭС имеют коэффициент готовности более 98%, что является одним из самых высоких среди других типов электростанций. Кроме коэффициента готовности нормируют коэффициент использования установленной мощности ВЭС. Среднее значение КИУМ в европейских странах составляет 24 % для ВЭС наземного размещения и 41 % для оффшорных ВЭС. КИУМ отечественных ВЭС наземного размещения составляет, в среднем, 27 %. Электрическая часть ВЭС состоит из трех основных компонентов. Это группа ветроэнергетических установок, коллекторная сеть и повышающая подстанция. Группа ВЭУ может быть расположена на большой площади. Сбор энергии отдельных ВЭУ производится через коллекторную электрическую сеть. Повышающая подстанция обеспечивает трансформацию напряжения до напряжения линии электропередачи или подстанции электрической сети, через которую происходит подключение ВЭС к электроэнергетической системе. Кроме первичного электрооборудования в состав электрической части ВЭС входят системы собственных нужд ВЭУ, КТП ВЭУ и повышающей подстанции. Главная электрическая схема должна обеспечивать заданный коэффициент надежности ВЭС и возможность проведения ремонтных и регламентных работ на агрегатах и оборудовании без прекращения подачи энергии потребителям. Для ветроэнергетических установок определяются следующие общесистемные технические параметры генерирующего оборудования: установленная мощность, максимальная располагаемая мощность, скорость снижения активной мощности, регулировочный диапазон активной мощности, регулировочный диапазон реактивной мощности, а также подтверждается готовность к участию в общем первичном регулировании частоты. Определение величины располагаемой мощности ветроэнергетических установок осуществляется с учетом скорости ветра.

Схемы генерации электрической энергии ВЭС

Асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором.

Данный тип генератора применяется с начала 1990-х годов и на сегодня являются устаревшим типом. Основным недостатком является фиксированная рабочая частота вращения турбины, что существенно ограничивает диапазон рабочих скоростей ветра. Колебания скорости ветра приводят к изменениям вырабатываемой мощности, что негативно

сказывается при работе генератора на ЭЭС малой мощности – возникают провалы и выбросы напряжения в узле подключения ВЭС к сети. Применение батареи конденсаторов, Рис. 4.15, снижает потребление реактивного тока из внешней сети. Расширение диапазона рабочих частот вращения турбины достигается применением конструкций ветрогенераторов с изменяемым количеством полюсов. Такие ветрогенераторы могут работать в двух диапазонах частот вращения. Устройство плавного пуска, УПП, позволяет ограничивать пусковые токи генератора при его включении или переключении, что важно при работе ВЭУ на электроэнергетическую систему небольшой мощности. Генератор подключается к повышающему трансформатору или коллекторной сети ВЭС без конвертора

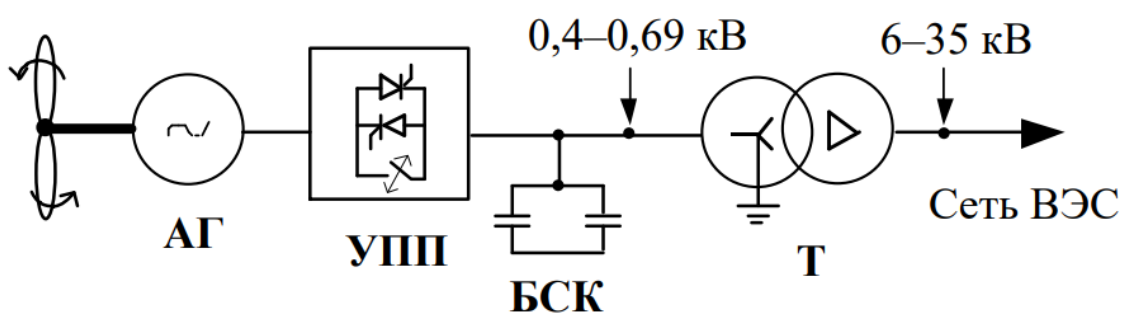


Рис. 4.15 Схема подключения асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором

Достоинством асинхронного генератора с короткозамкнутым является простота конструкции, делает его надежным и недорогим решением на ВЭС малой мощности.

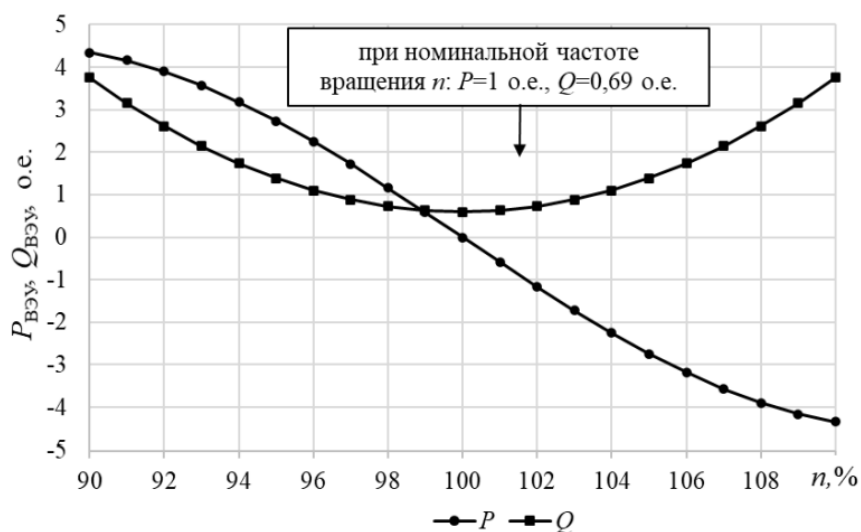


Рис. 4.16 Изменение активной и реактивной мощности асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором

На рис. 4.16 приведены зависимости вырабатываемой активной и потребляемой реактивной мощности асинхронным генератором с короткозамкнутым ротором от частоты вращения ротора, выраженной в о.е. Работа генератора с синхронной частотой вращения соответствует 100 % на диаграмме. С увеличением частоты растет скольжение и увеличивается потребление реактивной (положительные значения) и выработка активной (отрицательные значения) мощности.

Номинальной частоте вращения соответствует работа с выработкой номинальной мощности и поддержанию номинального напряжения на выводах обмотки статора. Работа генератора с частотой вращения выше номинальной сопровождается увеличением активной мощности, что приводит к перегрузке генератора. Этот режим сопровождается сверхнормативным положительным отклонением напряжения на выводах генератора.

Асинхронный генератор с регулируемым добавочным сопротивлением ротора. Асинхронный генератор с фазным ротором применяется с середины 1990-х годов и имеет аналогичную предыдущему типу схему подключения к сети, рис. 4.17. Достоинством является возможность работать в ограниченном диапазоне отклонений частоты вращения турбины. Это достигается автоматическим регулированием электромагнитного момента за счет изменения активного сопротивления роторного контура. С этой целью к роторной обмотке подключается внешний регулировочный реостат, управляемый контроллером по частоте вращения турбины. Типичный диапазон допустимых отклонений рабочих частот составляет от 0 до +10 % выше синхронной частоты вращения. Потери во внешнем резисторе, ограничивают номинальную мощность машины до нескольких сотен кВА.

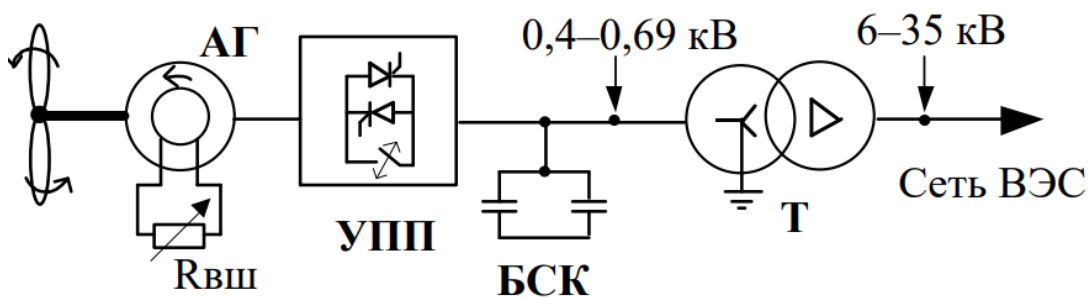


Рис 4.17 Схема подключения асинхронного генератора с фазным ротором

На рис. 4.18 приведены семейства зависимостей активной и реактивной мощности генератора при разных значениях добавочного сопротивления роторной цепи. Нулевому добавочному сопротивлению соответствуют зависимости мощностей, аналогичные асинхронному генератору с короткозамкнутым ротором, приведенные на рис. 4.17. С увеличением скорости ветра увеличивается частота вращения ротора генератора и вырабатываемая активная мощность. Для ограничения активной мощности увеличивают добавочное сопротивление ротора таким образом, чтобы новому значению частоты вращения соответствовал режим выработки номинальной мощности. Большим отклонениям частоты вращения соответствует большие значения добавочного сопротивления.

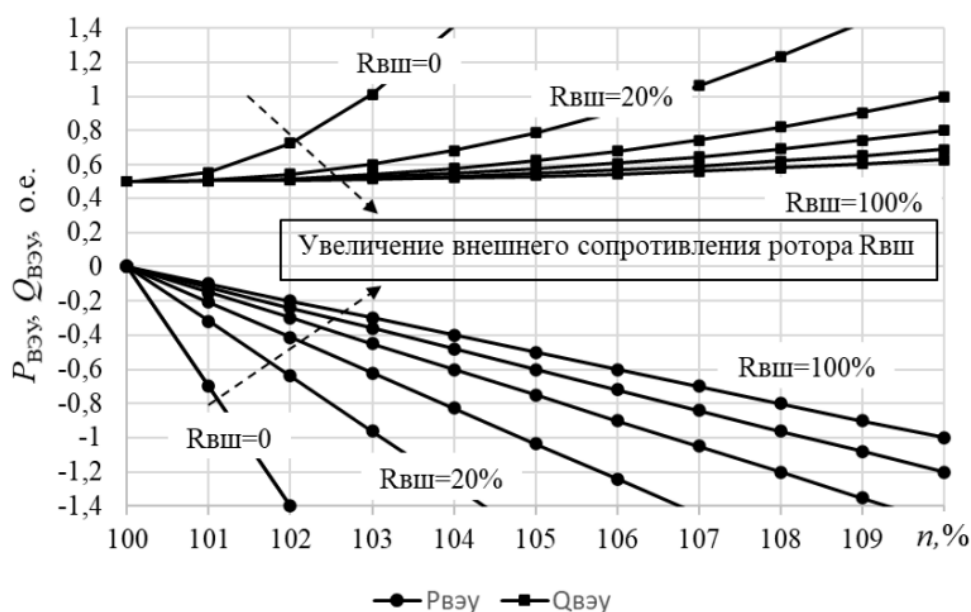


Рис. 4.18 Изменение активной и реактивной мощности асинхронного генератора с фазным ротором и регулировочным реостатом

Асинхронный генератор двойного питания. Асинхронный генератор двойного питания является асинхронной машиной с фазным ротором. Двойное питание заключается в том, что поле статорной обмотки создается за счет энергии внешней сети, как и в предыдущих рассмотренных случаях, а поле роторной обмотки - за счет внешнего источника, подключенного через конвертор, Рис. 4.19 Регулирование частоты и амплитуды тока ротора производится контроллером конвертора. Мощность конвертора определяется максимально допустимым рабочим скольжением и составляет около 30 % номинальной мощности генератора и позволяет работать при отклонениях частоты вращения ротора от -40 до +30 % синхронной частоты вращения.

Конвертор состоит из двух отдельных преобразователей с независимым управлением, роторного и сетевого, соединенных звеном постоянного тока с

конденсатором. Первый контролирует активную и реактивную мощности генератора путем регулирования составляющих тока ротора, а второй – напряжение в звене постоянного тока для обеспечения работы конвертора при заданном коэффициенте мощности генератора. При вращении турбины с превышением синхронной частоты реактивная мощность роторной обмотки через конвертор выдается в сеть. При вращении турбины с частотой ниже синхронной через конвертор реактивная мощность поступает в роторную обмотку. В обоих режимах со статорной обмотки генератор может выдавать как активную, так и реактивную мощность во внешнюю сеть. Слабыми местами являются скользящие контакты на роторе и защита конвертора при внешних коротких замыканиях.

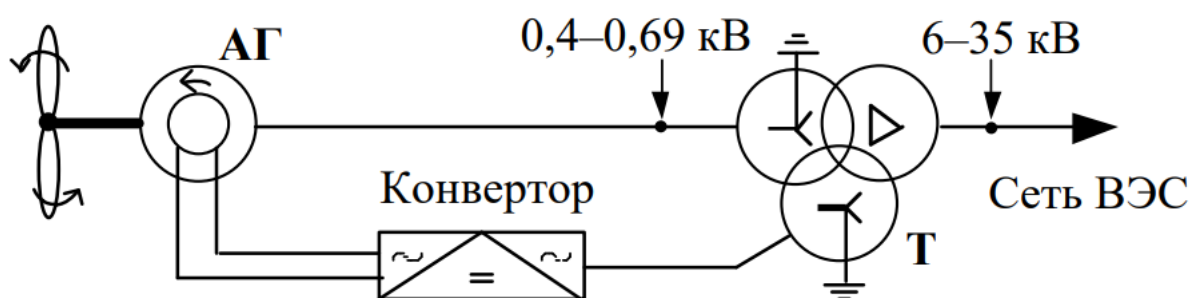


Рис. 4.19 Схема подключения асинхронного генератора двойного питания

Генератор с полноразмерным конвертором. Еще больший диапазон отклонений частоты вращения турбины допускает генератор, подключаемый к сети через конвертор, рассчитанный на номинальную мощность генератора, рис. 4.20 Конвертор состоит из двух преобразователей аналогично конвертору в цепи ротора асинхронного генератора двойного питания. Благодаря конвертору обеспечивается широкий диапазон регулирования выработки или потребления реактивной мощности. В качестве электрической машины может быть как синхронный, так и асинхронный генератор. Распространенным вариантом является синхронный генератор с возбуждением постоянными магнитами, PMSG.

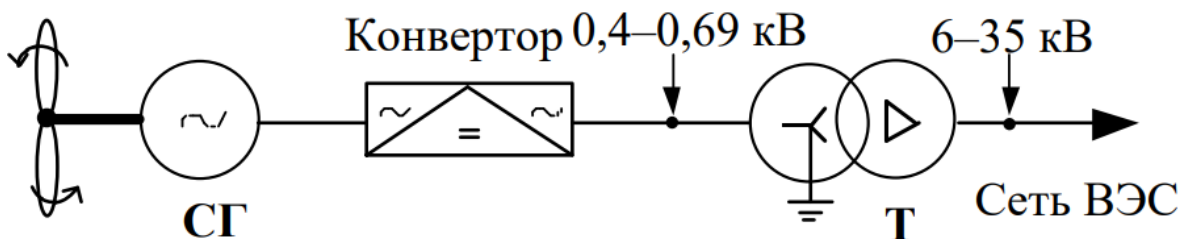


Рис. 4.20 Схема подключения генератора с полноразмерным конвертором

Синхронный генератор прямого подключения. Синхронный генератор подключается к сети или трансформатору напрямую. Частота вращения ротора и вырабатываемого генератором тока, а также активная мощность генератора поддерживается за счет механического конвертера частоты вращения и момента турбины. Благодаря конвертеру обеспечивается широкий диапазон рабочих частот ветра.

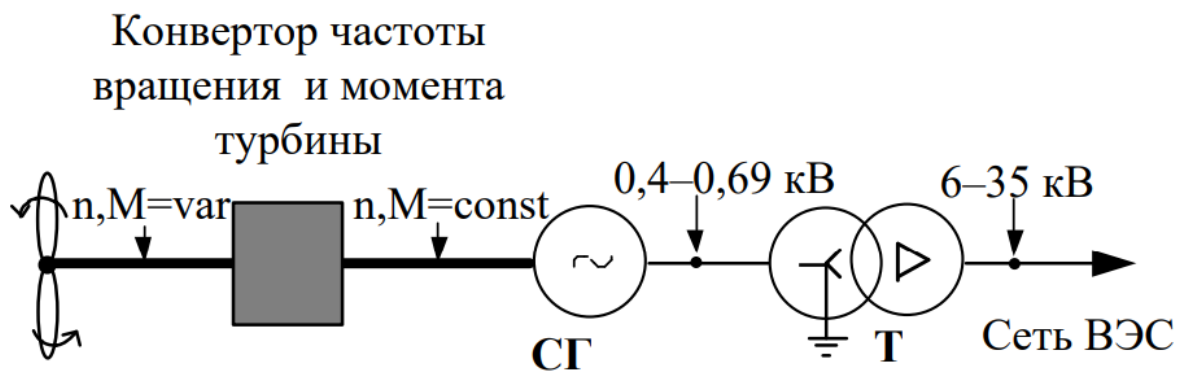


Рис. 4.21 Синхронный генератор прямого подключения