

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехники»

(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и
систем

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Моделирование режимов работы объектов малой
распределенной генерации

Студент

Э.Н. Кулуев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., Д.А. Кретов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Анализ режимов работы объектов распределенной генерации	9
1.1 Классификация объектов распределенной генерации	9
1.2 Описание электрических станций, относящихся к объектам распределенной генерации	15
1.2.1 Ветряные электростанции	15
1.2.2 Солнечные электростанции	21
1.2.3 Когенерационные установки	31
1.3 Описание электрических режимов электроэнергетической системы ...	40
1.3.1 Требования к режимам энергетической системы	42
1.3.2 Возникновение аварийных режимов и их классификация	45
1.4 Выводы по разделу 1	47
2 Влияние распределенной генерации на системы электроснабжения объектов	49
2.1 Влияние на параметры режимов электроснабжения	49
2.1.1 Влияние на величину потерь электроэнергии	49
2.1.2 Влияние на характеристики напряжения и его регулирование	51
2.1.3 Влияние на параметры качества электроэнергии	55
2.2 Влияние на работу систем защиты и автоматики и координацию устройств	58
2.2.1 Организация подключения МГ в точке общего сопряжения	58
2.2.2 «Автономизация» объектов малой генерации	62
2.3 Влияние МГ на работу защитных устройств и систем централизованной системы	66
2.3.1 Мероприятия и рекомендации по обеспечению функционирования и присоединения МГ при внедрении в системах электроснабжения объектов	67
2.4 Выводы по разделу 2	68

3 Моделирование режимов работы объектов малой распределенной генерации в программном комплексе для моделирования энергосистем PSCAD	70
3.1 Описание программного комплекса для моделирования энергосистем PSCAD	70
3.2 Моделирование режима влияния РГ на потери сети.....	73
3.3 Моделирование режима влияния РГ на токи короткого замыкания	77
3.4 Моделирование общей схемы распределенной системы генерации в PSCAD	84
3.4.1 Фотоэлектрическая система.....	87
3.4.2 Ветряная электростанция	99
3.4.3 Дизельная электростанция	109
3.5 Результаты моделирования схемы распределенной системы генерации в программном комплексе PSCAD.....	111
3.6 Выводы по разделу 3.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	116
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	120

ВВЕДЕНИЕ

«Распределенная генерация — это подход, который использует маломасштабные технологии для производства электроэнергии, близкой к конечным потребителям энергии. Технологии распределенной генерации часто состоят из модульных генераторов, иногда работающих на возобновляемых энергоресурсах. Распределенная генерация предлагает ряд потенциальных преимуществ. Во-первых, распределенная генерация может обеспечить более низкую стоимость электрической энергии, а во-вторых более высокую надежность, и безопасность с меньшими экологическими последствиями, чем объекты традиционной генерации» [33].

«Распределенная генерация (РГ) определяется как ограниченный источник энергии и обычно не превышает 10 МВт. Объект РГ подключается к подстанции либо распределительному фидеру. Некоторые из технологий РГ, такие как фотоэлектрические, топливные элементы, биомасса и ветряные генераторы, получили широкое огласку из-за высокой «пропаганды» возобновляемых источников энергии, но несомненным достоинством, относящимся к внедрению объектов РГ является снижение потерь мощности, которые по оценке экспертов могут превысить все другие доступные и используемые на сегодняшний день средства. Однако у РГ есть и недостатки, к ним можно отнести те же потери мощности в электроэнергетической системе (ЭЭС), при условии не правильного выбора места подключения и мощности объекта РГ. Следовательно, первостепенной задачей сохранения нормального режима работы ЭЭС является правильное планирование размещения и выбора мощности объекта РГ в структуре ЭЭС» [35].

Первоначальными энергоресурсами объектов распределенной генерации представляются малые энергетические установки (МЭУ), некоторые из них могут быть без топливными, т.е. работать на ветровой, солнечной, геотермальной и иных видах возобновляемых энергоресурсов и топливными, т.е. пользующиеся ископаемыми видами топлива (нефть, уголь, попутный нефтяной газ), так и биомассу разного происхождения. В

соответствии с федеральным законом №35-ФЗ «Об электроэнергетике», под объектами МЭУ предполагаются энергоустановки с мощностью до 25 МВт, тем не менее в законе установлены и объекты микроэнергетики, к которым принадлежат энергоустановки с мощностью до 1 МВт.

Определение «малая энергетика» — это распределенные генерирующие энергоустановки и комплексы, которые не подключены к централизованной электросети, действующие на базе ВИЭ и традиционных видов топлива. Применение объектов МЭУ в производстве электрической энергии значительно повышает энергобезопасность как отдельных регионов, так и страны в целом. В свою очередь, МЭУ – это главный источник энергии для удаленных и труднодоступных районов, где её недостаток считается сдерживающим причиной развития в регионах.

«Традиционные электростанции, такие как угольные, газовые и атомные, а также гидроэлектростанции и крупные солнечные электростанции, относятся к централизованной ЭЭС и часто требуют передачи электроэнергии на большие расстояния. В отличие от них, системы РГ являются децентрализованными, модульными и более гибкими. Их расположение предполагает близость потребителей, которых они обслуживают, хотя и имеют низкую мощность, 10 МВт и меньше. Эти системы могут содержать несколько компонентов генерации и хранения; в данном случае они называются гибридными энергетическими системами» [33].

«Существует два основных типа классификации устройств РГ. Первый тип классификации рассматривает установленную мощность генераторов: микро (1 Вт – 5 кВт); малые (5 кВт – 5 МВт); средние (5МВт – 50 МВт); крупные (50 МВт – 300 МВт)» [37].

Второй тип классификации основан на технологии производства электрической энергии: возобновляемые источники энергии (ВИЭ); не возобновляемые источники энергии.

ВИЭ разделяется на две категории – традиционные и нетрадиционные источники. В первой категории находятся: гидравлическая энергия воды, которая переходит в электрическую энергию; энергия биомассы, вырабатываемая в процессе сжигания древесного дров, угля, торфа. Она используется главным образом для выработки тепла, подаваемого в отопительную систему жилых зданий; геотермальная энергия, представляющаяся итогом естественного гниения и абсорбции минералами, которые находятся в недрах земли. В целом, солнце является неисчерпаемым источником энергии. Солнечное тепловое излучение преобразовывается в электрическую энергию с применением фотоэлементов, тепловых машин.

«Распределенная генерация дополняет централизованную систему новыми элементами с новыми динамическими характеристиками и возможностями управления, устройствами автоматики и регулирования. Для повсеместного применения распределенной генерации необходимо выполнять исследования устойчивости региональных электроэнергетических систем, оценивать нормальные, аварийные и послеаварийные режимы работы, так как широкое распространение распределенной генерации может существенно изменить сложившуюся структуру региональных ЭЭС и оказывать существенное влияние на работу источников централизованного электроснабжения» [33].

Актуальность тематики

Внедрение объектов малой распределенной генерации, прибыльно как потребителю электрической энергии, так сетевым компаниям, использование объектов малой генерации способствует в большей степени понизить перетоки и потери мощности в системе электроснабжения. К тому же, эти объекты могут увеличить надежность электроснабжения потребителей особой категории и потребителей первой категории надежности. В дополнение, объекты малой распределенной генерации обеспечивают районы с невысокой плотностью нагрузки, для самостоятельного энергоснабжения отдаленных потребителей, а также малоосвоенных и

труднодоступных районов. Развитие самостоятельной подотрасли такой как распределенная генерация, служит основанием перехода энергетического сектора России на пути модернизирования и инновационного развития. Применение объектов малой распределенной генерации в существующей ЭЭС позволяет увеличить экономическую эффективность энергетической отрасли, в том числе даст существенный потенциал в сфере защиты окружающей среды.

Внедрение объектов распределенной генерации также получило распространение в параллельной работе с энергосистемой, так же в режиме компенсации пиковых нагрузок в роли резервного источника электроснабжения. Большой актуальностью эта концепция обладает на объектах с наибольшим потреблением электроэнергии в пиковые часы, а также на объектах со значительными требованиями к надежности электроснабжения (имеющих потребителей I-й категории особой группы электроснабжения, требующих организации третьего источника).

Объектом исследования является модель режима работы объекта малой распределенной генерации.

Предметом исследования является определение влияния на параметры режима при внедрении объектов малой распределенной генерации в электроэнергетической системе.

Цели и задачи

1. Анализ режимов работы объектов распределенной генерации и классификация объектов распределенной генерации;
2. Определение параметров режима работы объектов распределенной генерации, оказывающих влияние на режим работы электроэнергетической системы;
3. Исследование режима работы электроэнергетической системы в присутствии объектов распределенной генерации;
4. Создание компьютерной модели;

5. Определение критериев оптимального числа объектов распределенной генерации в электроэнергетической системе.

1 Анализ режимов работы объектов распределенной генерации

1.1 Классификация объектов распределенной генерации

В широком значении слова распределенной генерацией можно назвать те объекты, которые расположены рядом с конечным потребителем, вне зависимости от того, кто считается их владельцем. Распределенная генерация тепловой и электрической энергии - не новейшее явление ни в России, ни в мире. На начальном этапе возникновения электро- и теплоэнергетики почти все источники электроэнергии для освещения, поставки механической энергии и тепла находились рядом с центрами потребления.

«Различие классов напряжений для передающих и распределительных сетей в различных странах, кроме того, создает барьер для четкого определения понятия объектов малой генерации. В связи с этим в этом случае будет в самый раз проводить различия по области компетенции энергетических компаний, связанных с передачей и распределением электроэнергии. Эти и многочисленные особенности международного характера усложняют формулировку общего значения РГ, учитывающего свойства расположения и классификации данных устройств. Следовательно, в качестве вводного возьмем следующее определение: «распределенная генерация – это энергетические ресурсы, мощностью не больше, чем 100 МВт, которые как с питающей стороны, так и со стороны потребления, имеют повсеместное использование в распределительных сетях для предоставления надежного электроснабжения потребителей» [18].

«Существует два основных типа классификации устройств РГ. Первая классификация рассматривает установленную мощность генераторных установок:

- микро (1 Вт – 5 кВт);
- малые (5 кВт – 5 МВт);
- средние (5МВт – 50 МВт);

– крупные (50 МВт – 300 МВт) (редко используются)» [25].

Следующая классификация основана на технологии производства электроэнергии:

– Возобновляемые источники энергии;

ВИЭ подразделяется на группы – традиционные и нетрадиционные источники.

В первую категорию ВИЭ входит:

– гидравлическая энергия воды, которая преобразуется в электрическую энергию. Каждая энергетическая станция вырабатывает ее посредством действия гидросилового оборудования, устанавливаемого на ней;

– энергия биомассы, получаемая в ходе сжигания древесного угля, дров, торфа. Она применяется в основном для выработки тепла, подаваемого в отопительную систему жилых и нежилых зданий;

– «геотермальная энергия, являющаяся результатом естественного гниения и поглощения минералами, находящимися в недрах земли, солнечной энергии. В сущности, солнце есть неисчерпаемый источник энергии. Его тепловое излучение преобразовывается в электрическую энергию с применением фотоэлементов, тепловых машин» [17].

Вторая группа состоит из энергии, которая существует в природе, окружающей человека:

– солнечной;

– ветровой;

– морских волн и течений;

– приливов и отливов океана;

– биотоплива;

– низкопотенциальной тепловой.

«Принцип использования возобновляемой энергии заключается в ее извлечении из постоянно происходящих в окружающей среде геологических

процессов. Она предоставляется потребителю, который использует ее для решения технических задач и удовлетворения своих нужд» [24].

Когенерационные установки

«Когенерация (от англ. «co + generation», «совместная генерация») — это процесс совместного производства электрической и тепловой энергии внутри одного устройства, как правило теплового двигателя. Электрическая энергия получается в результате преобразования тепловой энергии топлива в механическую работу - вращение ротора электрогенератора. Тепловая энергия получается за счёт эффективной утилизации попутного тепла (утилизация тепла охлаждающих жидкостей и уходящих газов), которое затем преобразуется в теплоносители – горячую воду и пар. В результате практически полного использования термодинамического потенциала топлива, достигаются наивысшие показатели суммарного КПД, которые недоступны технологиям раздельного производства энергии» [20].

Объекты малой распределенной генерации, основанные на ВИЭ, считаются наиболее благоприятными для окружающей среды. Объекты РГ, состоящие из отдельных модулей, изготавливаются и запускаются в работу за маленький отрезок времени при наличии достаточного спроса на электроэнергию. Электроустановки, работающие по принципу когенерации, могут использовать как электричество, так и тепло, вырабатываемое в процессе работы генераторной установки.

Микротурбины

Микротурбина – это высокооборотная газовая турбина, в чьей камере сгорания сжигается природный или какой-либо иной газ, выполненная в виде конструкции с одной движущейся деталью — неразъемным ротором, на котором соосно расположены электрический генератор, центробежный компрессор и центростремительная радиально-осевая турбина. Она представляет собой тепловой двигатель, в котором реализуется рабочий процесс (цикл) ГТУ с регенерацией.

Диапазон электрической мощности микротурбинной установки — электростанции не столь широк, как у классических газовых турбин, но он соответствует надобностям мелких и средних потребителей, принуждаемых к покупке сложными обстоятельствами по подключению к электросетям или теми потребителями, которые могут себе позволить ультрасовременное оборудование для решения проблем собственной генерации электричества и тепла.

Электрическая мощность микротурбинной установки простирается от 100 кВт до 2–3 МВт. Надо заметить, что более или менее высокая мощность энергокомплекса достигается путём объединения нескольких микротурбинных установок. Количество микротурбин может достигать 20-30 штук. Такие энергокомплексы называются кластерами. Возможно последовательное наращивание электрической мощности микротурбинного комплекса (кластера) по мере роста потребности электроэнергии, путем установки новых модулей.

«Преимущества микротурбин:

- эластичность и адаптивность к восприятию электрических нагрузок в диапазоне от 1 до 100%
- возможность длительной работы микротурбины на предельно низкой мощности - 1%, низкий уровень эмиссий,
- отсутствие дымовых труб,
- отсутствие в микротурбинах моторного масла, смазки
- отсутствие охлаждающих жидкостей,
- быстрое и технологичное подключение к топливным магистралям, электрическим коммуникациям и тепловым сетям,
- сервисное обслуживание микротурбины – 1 день, 1 раз в году,
- низкий уровень шума» [32].

Мини-ГЭС

Микро-гидроэлектростанция специализирована для выработки из гидравлической энергии воды в электрическую для последующей передачи выработанной электроэнергии в электросеть. Под словом микро имеется в виду, что эта гидроэлектростанция устанавливается на небольших водных объектах – малых речках или ручьях, протоках или изменениях высот систем водоподготовки, а мощность гидроустановки не превосходит 10 кВт.

Мини-ГЭС делят на два класса: это микро-гидроэлектростанции (до 150 кВт) и мини-гидроэлектростанции (до 2500 кВт). Первые используются преимущественно в домохозяйствах, и на маленьких предприятиях, вторые – на более мощных предприятиях. Для собственников загородных домов или малого бизнеса, вероятнее большую заинтересованность проявляют первые.

Микро-гидроэлектростанции по принципу действия подразделяют на следующие типы:

— «Водяное колесо, представляет собой колесо с лопастями, которое установлено перпендикулярно поверхности воды и наполовину в неё погруженное. Во время работы вода создает давление на лопасти и приводит колесо во вращение» [42].

Учитывая простоту изготовления и извлечения наибольшего КПД с наименьшими затратами, эта установка хорошо работает. Потому во многих случаях применяется и на практике.

Гирляндная ГЭС была названа благодаря своему внешнему виду: на стальной трос диаметром 10-15 мм, на котором, нанизаны роторы как бусины. Трос в исходном случае осуществляет функцию гибкого вала. Им перегораживают русло реки, при этом роторы полностью погружаются в воду. Один конец троса соединяется с подшипником, а второй - с валом генератора. Водный поток вращает роторы, а они, в свою очередь, вращают трос.

Уже в 50-е годы XX столетия народные умельцы сооружали гирляндные мини-ГЭС, используя генератор от автомобиля, а в качестве роторов - консервные банки.

Сегодня технологии двинулись вперед, и промышленность предлагает роторы различных видов, повышающие КПД генератора.

«В качестве гидроколес эффективнее использовать не консервные банки, а пропеллеры (аналоги детских вертушек), изготовленные из тонких металлических листов. Одно такое гидроколесо дает до 2 кВт энергии при скорости водного потока 2,5 м/с. Глубина погружения роторов зависит от времени года: летом их опускают на 0,2 глубины от поверхности воды, а зимой - на 0,5 глубины от поверхности льда (если водный поток замерзает). При этом глубина водного потока не должна превышать 1,5 м. То есть подобные мини-ГЭС устанавливаются на небольших речках и ручьях» [30].

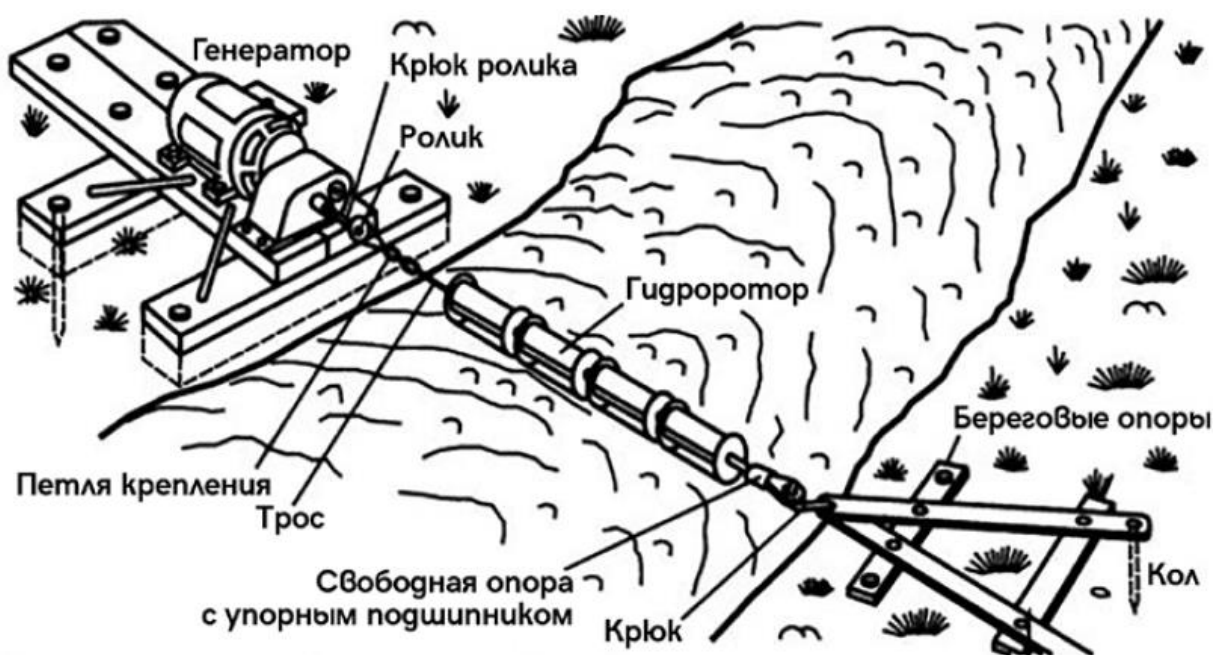


Рисунок 1 – Схема поперечной гирляндной электростанции

«Ротор Дарье представляет собой ротор, вращающийся за счет разности давлений на его лопастях. Разница давлений между лопастями возникает за счет обтекания жидкостью сложных поверхностей. Действие подобно подъемной силе крыла самолета или подъемной силе судов на подводных крыльях. На практике, МГЭС этой конструкции схожи с одноименным ветрогенераторам, но расположены в жидкостной среде» [5].

Фактически, в конструкции гидрогенератора ротор Дарье применяется довольно редко, потому что перед началом использования его необходимо раскрутить. К достоинствам такого гидрогенератора относится то, что раскрученный ротор Дарье не прекращает работать независимо от сезонных изменений скорости водного потока и т. д. Приостановить его эксплуатацию возможно только при полном промерзании воды. Но оборудование данного типа считается дорогостоящим и сложным в эксплуатации.

«Периоды, когда гидрогенератор не эксплуатируется, используются для технического обслуживания. Из главной триады без топливной энергетики - гидро-, ветро- и гелиоэнергетики - первая требует самых значительных первоначальных затрат, а оборудование наиболее сложно в эксплуатации и имеет самый малый ресурс службы (работа осуществляется в агрессивной среде» [12].

1.2 Описание электрических станций, относящихся к объектам распределенной генерации

1.2.1 Ветряные электростанции

Ветряная электростанция представляет собой группу ветряных турбин в одном и том же месте, используемых для производства электроэнергии. Ветряные электростанции различаются по размерам от небольшого количества турбин до нескольких сотен ветрогенераторов, охватывающих обширную территорию. Ветряные электростанции могут быть как на суше, так и на море.

Многие из крупнейших действующих наземных ветряных электростанций расположены в Китае, Индии и Соединенных Штатах. Например, самая крупная ветряная электростанция в мире, Ганьсу в Китае, имела мощность более 6000 МВт к 2012 году с целью 20 000 МВт к 2020 году. По состоянию на сентябрь 2018 года ветряная электростанция Walney мощностью 659 МВт в Великобритании является крупнейшей оффшорной

ветряной электростанцией в мире. отдельные конструкции ветротурбин продолжают увеличивать мощность, в результате чего требуется меньше турбин для одной и той же общей мощности.

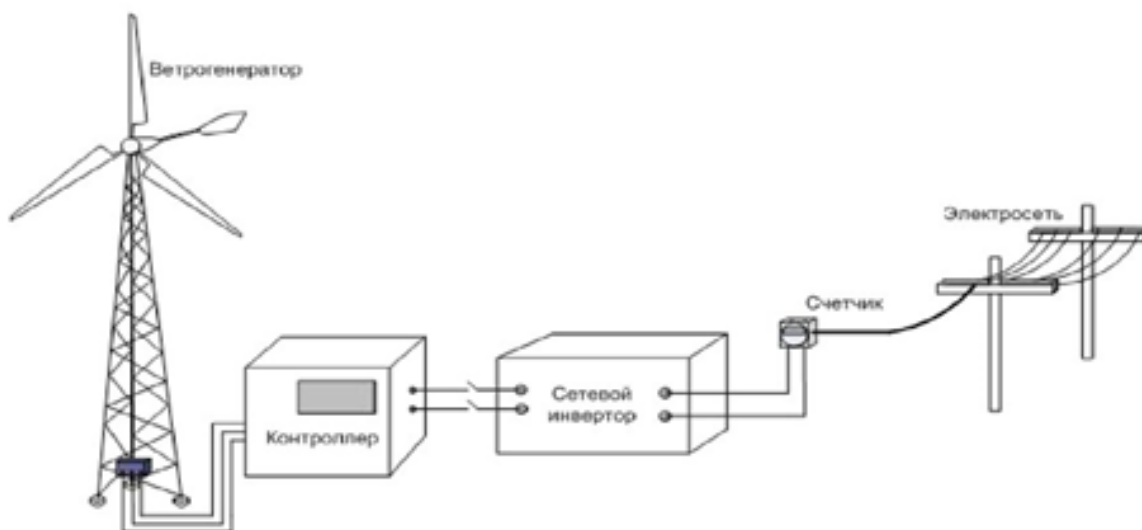


Рисунок 2 — Схема ветряной электростанции

Условно ветряные электростанции могут быть классифицированы по:

1) Выходной мощности:

– микро ветряные электростанции, с выходной мощностью до 100 Вт, используются для питания автономных электросетей,

– малой мощности с выходной мощностью от 100 Вт до 100 кВт, используется для питания отдельных домашних хозяйств или малых предприятий,

– крупные ветроэнергетические установки мощностью 100 кВт и выше, используемые для производства сетевой энергии,

– коммунальные услуги - масштаб более 1 МВт,

2) Конструкции,

3) Ротору ориентации оси:

– ветрогенераторы с вертикальной осью вращения,

– ветрогенераторы с горизонтальной осью вращения

4) Другим критериям:

- использование энергии ветра,
- частота вращения ротора (низкая, средняя, высокая)
- ориентация ротора и мачты относительно направления ветра – подветренная и надветренная.

Основными элементами ветротурбины являются ротор (лопасти и ступица), привод и система управления. Наиболее важным элементом турбины являются лопасти, поскольку именно они осуществляют фактическое преобразование энергии из кинетической в механическую, используя принцип создания подъемной силы на аэродинамическом профиле лопатки. В настоящее время наиболее популярной конфигурацией является горизонтальная конструкция с тремя лопастями.

Ветряные электростанции, как правило, оказывают гораздо меньшее воздействие на окружающую среду, чем многие другие электростанции. Береговые ветряные электростанции также подвергаются критике за их визуальное воздействие и воздействие на ландшафт, поскольку обычно они должны занимать больше Земли, чем другие электростанции, и должны быть построены в диких и сельских районах, что может привести к "индустриализации сельской местности", потере среды обитания и падению туризма. Критики связывают ветряные электростанции с неблагоприятными последствиями для здоровья (см. синдром ветряных турбин). Ветряные электростанции также подвергались критике за помехи радиолокационному, радио-и телевизионному приему.

Ветряная электростанция «имеет принцип действия, идентичный с другими ветровыми установками: сила ветра вращает лопасти ветряного колеса, которое передает крутящий момент на вал генератора посредством системы передач. В зависимости от конструкции энергия ветра передается также на электрогенератор или водяной насос. Чем больше ветра одновременно будет воздействовать на лопасть, тем сильнее происходит отдача в виде электроэнергии. Одними размерами решение вопроса получения максимальной отдачи не ограничивается. Воздушные потоки на

разной высоте ведут себя неодинаково. Вблизи земли их сила снижается, и скорость замедляется из-за с ландшафта, тормозящего перемещение ветра. Чем выше находится ветряное колесо, тем мощнее поток воздуха, попадающий на него» [16].

Важной частью ветрогенератора является генератор, преобразующий механическую энергию в электрическую. По мере увеличения скорости вращения генератора его размеры и масса уменьшаются. Генераторы содержат только один или два подшипника, которые подвергаются большой нагрузке. Правильная установка вала генератора относительно вала коробки передач имеет решающее значение для правильной работы всей турбинной системы. Генераторы можно разделить на три основные группы:

- индукционные генераторы,
- генераторы на постоянных магнитах,
- синхронные генераторы.

В прошлом синхронные генераторы редко использовались из-за необходимости точно подстраиваться под частоту электроэнергетической сети. Однако в последние годы этот тип конструкции успешно возвращается в турбины с прямым приводом. В крупномасштабных ветрогенераторах наиболее часто используемыми генераторами являются асинхронные генераторы, вырабатывающие переменный ток (АС) частотой 50-60 Гц. Преимуществом использования асинхронных генераторов является их простая конструкция и определенная гибкость в скорости вращения приблизительно, что позволяет турбинной системе приспосабливаться к случайным порывам ветра. В течение многих лет конструкция асинхронных генераторов претерпевала модификации, среди которых было внедрение электронных систем, называемых силовыми преобразователями, что позволяло регулировать частоту вращения. Силовые преобразователи также синхронизируют генераторы с электроэнергетической сетью.

Все чаще в коммунальных турбинах стали использоваться генераторы с постоянными магнитами. Постоянные магниты, используемые в

современных конструкциях генераторов, изготавливаются из редкоземельных металлов, что позволяет генерировать более сильное магнитное поле. Более высокая цена таких материалов является их главным недостатком. Несмотря на то, что генераторы на постоянных магнитах крупнее и дороже асинхронных генераторов, они обеспечивают меньшие потери мощности, повышенную надежность и КПД даже при работе под низкой нагрузкой.

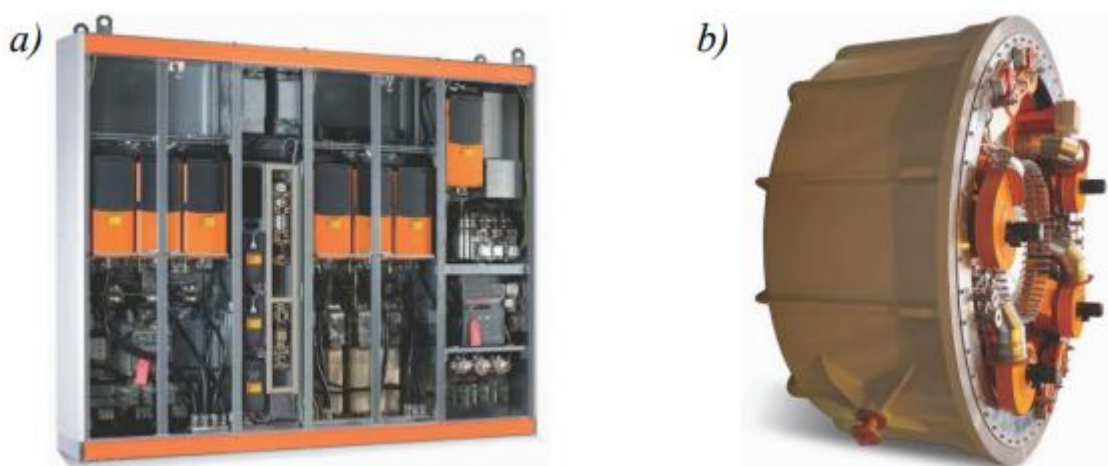


Рисунок 3 – а) Силовой преобразователь, б) генератор на постоянных магнитах

В настоящее время все большую популярность приобретают безредукторные коробки передач. Эта тенденция связана с тем, что, помимо крутящего момента, поперечные силы также часто передаются в трансмиссию через главный вал. Генераторы с прямым приводом начинают пользоваться особой популярностью в высокомоментных турбинах на море. Это решение выгодно за счет исключения обслуживания турбинных редукторов на морских фермах, где эта операция может быть сложной и трудоемкой. Более низкая скорость вращения систем с прямым приводом также увеличивает срок службы конструкции. Недостатком использования прямых приводов и низкоскоростных генераторов является их результирующее

увеличение габаритных размеров и следовательно веса, что увеличивает стоимость конструкции. Турбины с прямым приводом используют двухгенераторные системы для работы на низких и высоких скоростях. Другим решением может быть использование генератора с переменной скоростью вращения. Это, однако, имеет свои недостатки, поскольку результатом будет переменный ток, который вынуждает использовать преобразователь переменного тока в постоянный, что опять же увеличивает стоимость производства турбины.

Еще одним важным элементом конструкции ветротурбины является система управления, интегрирующая сигналы от многих датчиков, установленных на ее компонентах. Эта система оптимизирует работу турбины и обеспечивает безопасность в случае неисправности или внезапного ухудшения погодных условий. Система управления должна непрерывно контролировать многие параметры, ответственные за эффективную работу турбины, такие как:

- позиционирование лопастей в оптимальном направлении относительно ветра,
- установка соответствующего шага лопастей,
- запуск и остановка,
- охлаждение компонентов,
- управление системой антиобледенения,
- диагностика.

К преимуществам ВЭС можно отнести:

- независимость от ископаемых ресурсов,
- используется абсолютно бесплатный источник энергии,
- экологическая чистота методики — никакого вреда окружающей природе не наносится,
- доступность.

При этом, есть и недостатки:

- неравномерность ветра создает определенные трудности в выработке энергии и вынуждает использовать большое число аккумуляторных батарей;
- ветряные электростанции издают шум при работе;
- КПД у ветряных электростанций достаточно низок, увеличить его достаточно проблематично;
- стоимость данного оборудования и, следовательно, электроэнергии, значительно выше, чем цена сетевого электричества;
- «окупаемость оборудования с ростом его мощности значительно снижается. Использование небольших станций способно обеспечить энергией ограниченное количество потребителей, поэтому для крупных населенных пунктов или регионов требуются большие устройства. При этом, ветряки большой мощности нуждаются в соответствующих потоках ветра и равномерности его движения, что для условий нашей страны не характерно. В этом кроется основная причина низкого распространения ветряных электростанций по сравнению с европейскими странами» [16].

1.2.2 Солнечные электростанции

Солнечная энергетика – одна из наиболее динамически развивающихся отраслей альтернативной (возобновляемой) энергии. Она основана на преобразовании энергии, излучаемой Солнцем, в другие типы энергии, например, в электричество или тепло. Солнечная энергетика – исключительно экологична, она не оказывает никакого влияния на окружающую среду. Её развитие стимулируется как чисто экономическими факторами (к таким можно отнести постоянно растущие цены на традиционные (уголь, нефть, торф, газ) источники энергии, снижение стоимости оборудования для станций, работающих на возобновляемых (альтернативных) источниках энергетике при увеличении их производительности, что в целом приводит к снижению себестоимости вырабатываемой электроэнергии. В 2016 году «солнечное» электричество стало самым дешевым по сравнению с другими альтернативными способами

электрогенерации, например, волновыми или ветровыми станциями), и государственной поддержкой (специальные программы, поощряющие строительство солнечных электростанций за счет применения экономически привлекательного зеленого тарифа для выкупа произведенной электроэнергии).

Солнце — это неисчерпаемый источник энергии, который при правильном использовании может обеспечить достаточное количество электроэнергии как для промышленности, так и для жилого сектора. Его потенциал просто огромен. Именно светило является источником жизни на планете. Преобразование света в энергию — это давнее изобретение. В 16 веке была изобретена машина, которая качала воду из-за того, что нагретый солнцем воздух расширялся и оказывал необходимое давление

Солнечные электростанции — одна из самых перспективных и динамично развивающихся отраслей возобновляемой (нетрадиционной) энергии. Ежегодный прирост мощностей, вводимых в эксплуатацию, на протяжении 2000-2016 годов составляет порядка 50%. Всего за полтора десятка лет доля солнечного электричества в мировой энергетике достигла более 5%. Совершенствование технологии изготовления фотоэлектрических модулей привело к существенному снижению себестоимости солнечного электричества — в более чем 30 странах (Германия, Чили, Австралия, Мексика) оно стало дешевле, чем получаемое из ископаемых (нефть, газ, уголь) источников. За последние 10 лет инвестиции в солнечную энергетику составили порядка 300 миллиардов долларов. Наиболее показательный пример успешности применения солнечных технологий — остров Тау (Американское Самое), ранее полностью зависевший от поставок дизельного топлива, после установки современной СЭС стал полностью энергонезависимым.

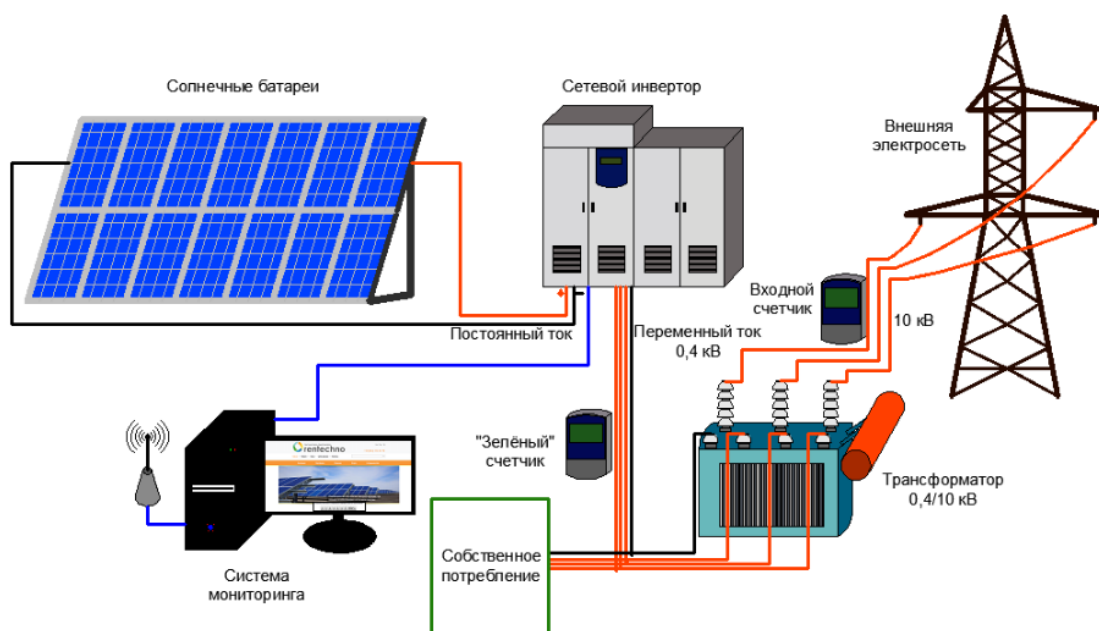


Рисунок 4 – Типовая структура солнечной электростанции

Чтобы понять, какими особенностями обладает строительство и эксплуатация СЭС промышленного образца, рассмотрим их отличительные черты:

- Использование бесплатной, возобновляемой энергии, доступной практически в неограниченных объемах – солнечного излучения. Которое, кроме всего, нет необходимости доставлять к месту генерации электричества.

- Высокая надежность – современные солнечные батареи могут эффективно эксплуатироваться в течение 25 лет. Кроме того, станция не имеет движущихся/вращающихся частей, которые особенно быстро изнашиваются и требуют быстрой замены.

- Низкие затраты на эксплуатацию – современная солнечная электростанция отличается высокой степенью автоматизации всех процессов, поэтому требует минимального количества обслуживающего персонала.

- Техническое обслуживание солнечных станций для поддержания работоспособности станции очень мало затратные и не требует проведения трудоемких дорогостоящих операций.

- Возможность задействовать под строительство солнечной электростанции не только свободные площади, но и те, которые

используются малоэффективно или вообще не используются, например, фасады и крыши зданий – это не только позволяет сэкономить территорию, но и значительно снижает капиталовложения в возведение СЭС.

- Объемы генерации электроэнергии в несколько раз превосходят те, которые были затрачены для её производства.

- Высокая скорость возврата инвестиций – на сегодняшний день, инвестиции в солнечную энергетику окупаются быстрее, чем в нефтегазовую отрасль.

Виды концентрирующих солнечных тепловых электростанций

Существует три основных типа концентрирующих солнечных тепловых энергетических систем:

- Линейные концентрирующие системы, включающие параболические желоба и линейные отражатели Френеля

- Солнечные электростанции башенного типа

- Тарельчатые электростанции

Линейный отражатель Френеля

Линейный отражатель Френеля (LFR) для производства солнечной энергии представляет собой систему, которая концентрирует солнечное излучение в приемной трубке, установленной в фокусной точке зеркала Френеля слежения за движением солнца и генерирует высокотемпературные рабочие среды для выработки тепловой энергии цикла. Основные компоненты производства электроэнергии LFR включают в себя отражающее зеркало вкладыша, приемную трубку и систему передачи. Система генерации мощности линейных отражателей-это упрощенная система параболических корыт электроэнергии. Параболический концентратор желоба заменен поверхностным зеркалом; Зеркало имеет небольшое расстояние до земли, низкую ветровую нагрузку, простую конструкцию, интенсивную компоновку и более высокую эффективность использования земли; кроме того,

вакуумная обработка приемной трубки не требуется, что снижает технические трудности и затраты. Однако из-за низкого коэффициента концентрации системы рабочая температура остается низкой, что также приводит к низкой эффективности системы.

Линейные концентрирующие системы собирают солнечную энергию с помощью длинных, прямоугольных, изогнутых (U-образных) зеркал. Зеркала фокусируют солнечный свет на приемниках (трубках), которые проходят по всей длине зеркал. Концентрированный солнечный свет нагревает жидкость, протекающую по трубкам. Жидкость направляется в теплообменник для кипячения воды в обычном паротурбинном генераторе для производства электроэнергии. Существует два основных типа линейных концентраторных систем: параболические желобчатые системы, в которых приемные трубки расположены вдоль фокальной линии каждого параболического зеркала, и линейные рефлекторные системы Френеля, в которых одна приемная трубка расположена над несколькими зеркалами, чтобы обеспечить большую подвижность зеркал при слежении за солнцем.

Электростанция с линейным концентрирующим коллектором имеет большое количество коллекторов в параллельных рядах, которые обычно выровнены в направлении Север-Юг, чтобы максимизировать сбор солнечной энергии. Эта конфигурация позволяет зеркалам отслеживать солнце с востока на запад в течение дня и непрерывно концентрировать солнечный свет на приемных трубках.

Технология линейного отражателя Френеля получила свое название от линзы Френеля, которая была разработана французским физиком Огюстеном-Жаном Френелем для маяков в 18 веке. Принцип действия этой линзы заключается в разбиении непрерывной поверхности стандартной линзы на множество поверхностей с разрывами между ними. Это позволяет существенно уменьшить толщину (а значит, и массу и объем) линзы за счет снижения качества изображения линзы. Там, где цель состоит в том, чтобы

сфокусировать источник света — это влияние на качество изображения не имеет большого значения

Главное преимущество систем Френеля заключается в том, что их простая конструкция плоских или гибко изогнутых зеркал и неподвижных приемников требует меньших инвестиционных затрат и предлагает широкий спектр конфигураций. Первоначально разработанные для применения на низких и средних мощностях, линейные концентрирующие системы в настоящее время разрабатываются для более высоких температур, которые облегчают прямое парообразование, которое может быть эффективно использовано в промышленном или энергетическом секторе.

Системы Френеля могут быть сконфигурированы для работы в широком диапазоне температур, от 200 до 500°C, хотя системы с температурой до 550°C находятся в стадии разработки. Области применения варьируются от тепла промышленных процессов, распределенной выработки электроэнергии с использованием органического цикла Ренкина до систем паровых турбин.

Принцип разделения оптического элемента на сегменты, которые имеют тот же (или очень похожий) оптический эффект, что и исходный оптический элемент, также может быть применен к зеркалам. Параболическое зеркало можно разделить на кольцевые сегменты, образуя круглое зеркало Френеля, которое фокусирует свет, поступающий в лучах, параллельных оптической оси, на фокусную точку параболоидного зеркала.

Зеркала фокусируют солнце на приемнике, который содержит теплоноситель, который в некоторых конструкциях может быть водой, маслом или даже расплавленной солью. Используемый теплоноситель будет зависеть от рабочей температуры системы. Основное различие между этими системами заключается в том, как отслеживаются солнечные лучи, и именно это приводит к удешевлению стоимости системы Френеля. В системе желоба вся конструкция вращается вокруг оси, совпадающей с фокусом желоба. Это означает, что зеркала и коллектор соединены механически, требуя

подшипников, через которые должна проходить коллекторная трубка. В системе Френеля отдельные зеркала вращаются, чтобы отслеживать движение Солнца. Между зеркалами и коллектором нет никакой механической связи.

Разделение зеркал и приемника позволяет использовать высокотемпературные теплоносители, а также значительно расширить область применения в конструкции приемника. Система Френеля также позволяет индивидуально управлять каждым зеркалом, эффективно изменяя конфигурацию отражателя для оптимизации его функций.

Солнечные электростанции башенного типа

«Солнечные электростанции башенного типа генерируют электроэнергию из солнечного света, фокусируя концентрированное солнечное излучение на башенном теплообменнике (ресивере). Система использует сотни и тысячи зеркал слежения за солнцем, называемых гелиостатами, чтобы отражать падающий солнечный свет на приемник. Эти установки лучше всего подходят для применения в коммунальном масштабе в диапазоне от 30 до 400 МВт. В башне солнечной энергии с расплавленной солью жидкая соль при температуре 290°C перекачивается из "холодного" резервуара для хранения через ресивер, где она нагревается до 565°C, а затем в "горячий" резервуар для хранения» [30].

При использовании установки, горячая соль перекачивается в парогенерирующую систему, в которой производится перегретый пар для обычной системы турбины/генератора. Из парогенератора соль возвращается обратно в холодное хранилище, где она находится и в конечном итоге повторно нагревается в ресивере.

Установка объема оптимального размера хранилища для удовлетворения требований к энергоснабжению системы считается значимой частью процесса проектирования энергосистемы. Хранилища могут быть спроектированы с необходимой емкостью для питания турбины на полную

мощность на протяжении 13 часов. Поле гелиостата, окружающее башню, проложено таким образом, чтобы оптимизировать ежегодную производительность установки. Поле и приемник также имеют размер в зависимости от потребностей электростанции. В обычной электроустановке сборка солнечной энергии совершается со скоростью, превышающей максимальную, нужную для подачи пара в турбину.

«Следовательно, система тепловых накопителей может быть заряжена одновременно с тем, что станция вырабатывает энергию на полную мощность. Отношение тепловой мощности, обеспечиваемой коллекторной системой (полем гелиостата и приемником) к пиковой тепловой мощности, требуемой турбогенератором, называется солнечной кратностью. С солнечной кратностью приблизительно 2,7, энергетическая башня из расплавленной соли, расположенная в Калифорнийской пустыне Мохаве, может быть спроектирована с годовым коэффициентом мощности около 65%. Следовательно, электростанция потенциально может работать в течение 65% года без необходимости в резервном источнике топлива. Без накопления энергии солнечные технологии ограничены годовыми коэффициентами мощности» [30].

Основное достоинство башни солнечной энергии состоит в том, что концентрация света на одном приемнике (башне) дает более высокие температуры. Зеркала в системе солнечных башен получают солнечный свет, отслеживая солнце по двум осям. Это более выгодно, так как он может получать солнечный свет даже тогда, когда Солнце находится низко на небе, как это бывает в зимние месяцы или даже на рассвете и в сумерках. Более эффективно используется солнечный свет. Солнечные электростанции-это экологически чистые системы. Никакие опасные газы или жидкие выбросы не выделяются. Если произойдет разлив соли, то соль замерзнет до того, как произойдет значительное загрязнение почвы. Затем он может быть поднят лопатой и при необходимости переработан.

Тарельчатые электростанции

«Тарельчатые электростанции используют параболическую тарелку зеркал для того, чтобы направить и сконцентрировать солнечный свет на центральный двигатель, который производит электричество. Система тарелка/двигатель представляет собой технологию концентрирования солнечной энергии, которая производит меньшее количество электроэнергии, чем другие технологии — обычно в диапазоне от 3 до 25 киловатт, — но полезна для модульного использования. Две основные части системы - это солнечный концентратор и блок преобразования энергии. Солнечный концентратор, или тарелка, собирает солнечную энергию, поступающую непосредственно от солнца. Полученный луч концентрированного солнечного света отражается на тепловой приемник, который собирает солнечное тепло. Тарелка установлена на структуре, которая непрерывно отслеживает солнце в течение всего дня, чтобы отразить максимально возможный процент солнечного света на тепловой приемник» [4].

«В состав блока преобразования мощности входит тепловой приемник и двигатель/генератор. Тепловой приемник – интерфейс между двигателем / генератором и тарелкой. Приемник поглощает концентрированные лучи энергии солнца, преобразуя эту энергию в тепло и передает тепло двигателю/генератору. Тепловой приемник представляет собой небольшой ряд трубок с охлаждающей жидкостью как правило гелием или водородом, которая чаще всего является теплоносителем, в том числе рабочей жидкостью для двигателя. Другими теплоприемниками являются тепловые трубы, где конденсация и кипение промежуточной жидкости передает тепло двигателю» [4].

Система двигатель / генератор — это подсистема, которая принимает тепло от теплового приемника и использует его для производства преобразования тепловой энергии в электрическую. Наиболее

распространенным типом теплового двигателя, используемого в системах, тарелка / двигатель, является двигатель Стирлинга. Двигатель Стирлинга использует нагретую жидкость для перемещения поршней и создания механической мощности. Механическая работа, в виде вращения коленчатого вала двигателя, приводит в движение генератор и вырабатывает электрическую энергию.

Тарелка, которая более конкретно называется концентратором, является основным солнечным компонентом системы. Он собирает солнечную энергию, поступающую непосредственно от солнца (солнечную энергию, которая заставляет вас отбрасывать тень), и концентрирует или фокусирует ее на небольшой площади. Результирующий солнечный луч обладает всей силой солнечного света, попадающего на тарелку, но концентрируется на небольшой площади, так что его можно использовать более эффективно. Стеклозеркала отражают ~92% солнечного света, который попадает на них, являются относительно недорогими, могут быть очищены и прослужить долгое время в наружной среде, что делает их отличным выбором для отражающей поверхности солнечного концентратора. Структура тарелки должна непрерывно отслеживать солнце, чтобы отразить Луч в тепловой приемник.

Система имеет конструкторский характер сборки. Каждый модуль такой электростанции на солнечной энергии состоит из нескольких частей:

— Опоры. Она предназначена для крепления фермы, которая служит основанием для остальных элементов.

— Приемники. Выполняет функцию концентрации солнечных лучей. Приемником может выступать двигатель Стирлинга или парогенератор.

— Отражатели. Используется, чтобы сконцентрировать солнечные лучи в генератор, расположенный прямо перед ним. Именно форма отражателя в виде тарелок дала название таким СЭС. Зеркала расположены на ферме по радиусу. Каждое из них индивидуально настроено.

1.2.3 Когенерационные установки

Когенерация применяется в отрасли электроэнергетики, и представляет собой технологический процесс одновременного совместного производства электрической и тепловой энергии. Основным посылом при развитии когенерации является тот факт, что в процессе выработки электрической энергии имеется техническая возможность утилизировать (снимать) попутное тепло.

В настоящее время данный процесс является наиболее экономически целесообразным способом выработки энергоресурсов, повышая общий КПД когенерационных установок до 90%. Когенерация в России и мире активно используется в современных энергетических системах, на городских теплоэлектроцентралях (ТЭЦ), оказывающих централизованное электро- и теплоснабжение большому числу потребителей.

Когенерационные установки (когенераторы) используются в отрасли малой распределенной генерации (мини-ТЭЦ, мини-ТЭС) в локальных энергосистемах. Такое развитие объясняется целым рядом факторов, главные из которых - близость размещения к потребителю, независимость от внешних поставок энергоресурсов, повышение надежности энергоснабжения. В малой распределенной энергетике наибольшее распространение получили установки когенерации на базе газопоршневых двигателей и газотурбинных агрегатов.

Принцип работы когенерационных установок

В зависимости от принципа действия выделяют несколько типов когенерационных станций. Рассмотрим когенераторы на базе газопоршневых агрегатов. Горючий газ необходимых параметров поступает на газопоршневой двигатель. В процессе сжигания топлива образуется механическая энергия, передается через единый вал на генератор и преобразуется в электрическую энергию стандартных параметров качества.

При работе двигателя внутреннего сгорания выделяется большое количество теплоты, которое можно утилизировать с помощью специального оборудования и затем использовать. При этом для получения данной энергии не затрачивается дополнительное количество топлива – данный продукт является попутным при технологическом процессе выработки электрической энергии. Основные источники попутного тепла при работе газопоршневой электростанции:

- тепло охлаждающей воды («рубашка» охлаждения двигателя);
- тепло отходящих газов (отработавшие выхлопные газы).

Данные источники можно использовать для получения тепловой энергии (утилизации тепла), регулируя тем самым температуру и объем получения энергетического ресурса, а также объем устанавливаемого вспомогательного оборудования.

Система утилизации тепла с когенерационных установок позволяет получать попутную тепловую энергию необходимых параметров с помощью теплообменников и котлов-утилизаторов, с помощью которых отводится тепло от нагретых частей и сред. Вырабатываемая тепловая энергия подается в существующую систему теплоснабжения предприятия (когенерация). При неиспользовании попутного тепла тепловая энергия сбрасывается в атмосферу.

Принципиальная схема технологического процесса утилизации тепла с газопоршневых агрегатов приведена на рисунке ниже.

Термический (тепловой) КПД ГПУ находится примерно на одном уровне с электрическим, обеспечивая практически одинаковые выходные параметры по электрической и тепловой мощности вне зависимости от того, рассматривается когенерационная установка малой мощности, средней или большой.

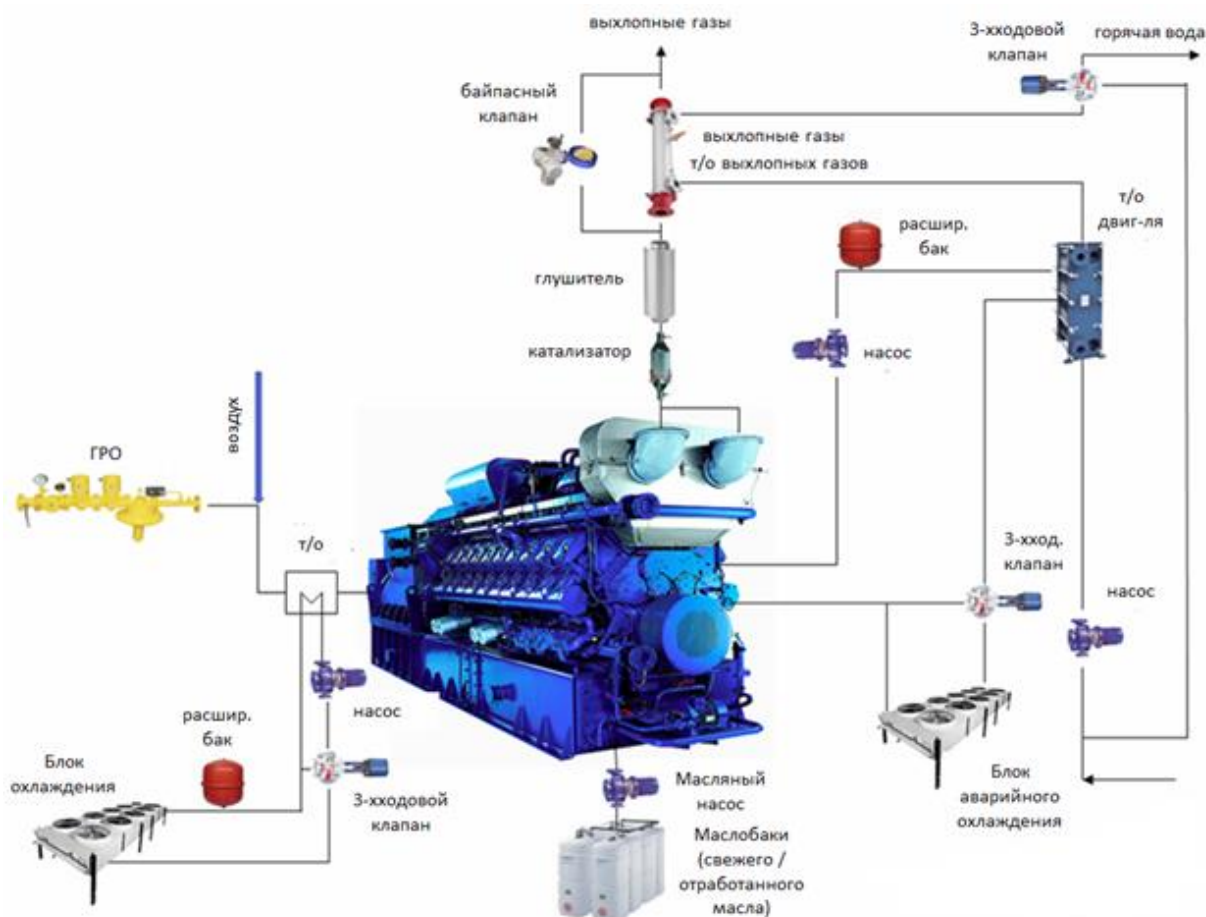


Рисунок 5 – Принципиальная схема устройства установки когенерации

Работа системы утилизации тепла газопоршневой установки организована несколькими тепловыми контурами. Укрупненная схема технологического процесса работы контуров ГПУ номинальной электрической мощностью 2000 кВт для обеспечения утилизации тепла с теплообменников и котлов-утилизаторов приведена на рисунке ниже.

Температура воды на выходе из системы утилизации тепла когенерационной установки 90°C , на входе вода поступает с температурой 70°C . 50% тепла получается за счет охлаждения двигателя с помощью теплообменников этиленгликоль/вода, при этом, теплоноситель нагревается на 10°C (с 70°C до 80°C). Остальные 50% тепла производится за счет охлаждения отводимых дымовых газов с 500°C до 120°C на котле-утилизаторе. Теплоноситель при этом нагревается еще на 10°C (с 80°C до 90°C). При работе газопоршневой электростанции выработка электрической энергии является приоритетной задачей. Выработка тепловой энергии

(когенерация тепла) пропорциональна степени загрузки машины (количеству вырабатываемой электроэнергии). Когенерационные установки российского производства реже встречаются на рынке малой распределенной энергетики, но имеют аналогичный принцип работы и условия.

Управление когенерационными установками

В целях управления и контроля за работой газопоршневым когенерационным агрегатом устанавливаются шкафы управления. Монтаж данных шкафов производится в непосредственной близости от самого агрегата. Место расположения устройства управления (управляющего компьютера) может быть свободно выбрано в зависимости от пожелания заказчика: как на агрегате, так и на пульте управления.

Система управления выполняет определенный набор основных функций, необходимый для безопасной и эффективной эксплуатации когенерационной установки: мониторинг все параметров, управление основными системами, исполнительными механизмами, коммутационной и запорно-регулирующей аппаратурой.

Расширенные функции системы управления связаны, в том числе, с работой системы утилизации тепла, в частности, но не ограничиваясь следующие:

– Утилизация тепла в контуре нагрева: расширение предохранительной цепи для контроля контура нагрева и регулировка входной температуры охлаждающей воды двигателя, а также подающей магистрали контура нагрева посредством управления трехходовым клапаном в контуре нагрева.

Измерение температуры, подающей и обратной магистралей, греющей воды перед теплообменником охлаждающей воды, контроль температуры отходящих газов после теплообменника отходящих газов. Регулирование контура обогрева обеспечивает стабильность температуры греющей воды в подающей магистрали также и при неполной нагрузке двигателя, в то же

время, заботясь о соблюдении требований двигателя касательно температуры охлаждающей воды;

- Мониторинг температуры отходящих газов после двигателя и после катализатора;

- Управление системой аварийного охлаждения и байпаса выхлопных газов;

- Управление охладителем контуров охлаждения смеси и охлаждения двигателя или системы аварийного охлаждения.

При работе газопоршневой установки в режиме когенерации выработка электрической энергии является приоритетной задачей работы установки. Выработка (утилизация) тепловой энергии пропорциональна степени загрузки машины (количеству вырабатываемой электроэнергии). При превышении тепловой мощности, вырабатываемой электростанцией над мощностью потребления, неиспользованная или лишняя часть попутного тепла газопоршневых установок сбрасывается в атмосферу. При обратной ситуации, при дефиците тепла, утилизируемого с газопоршневой установки, когда требуемая электрическая нагрузка меньше тепловой, проблему нехватки тепла решают путем установки дополнительных водогрейных или паровых котлов параллельно с системой утилизации тепла установки когенерации.

Режим когенерации является наиболее экономически целесообразным способом выработки энергоресурсов, повышая общий КПД когенерационных установок свыше 90%.

Виды когенерации

Система утилизации тепла газопоршневых электростанций позволяет снимать попутное тепло от работающего двигателя с помощью теплообменников и котлов-утилизаторов. Система позволяет получить тепловую энергию необходимых параметров:

– Горячая вода, стандартный температурный график 90/70°C (водогрейные теплообменники и котлы-утилизаторы). При необходимости параметры можно повысить с помощью пиковых котлов;

– Насыщенный пар стандартных параметров (паровые котлы-утилизаторы). При необходимости пар можно сделать перегретым при помощи пароперегревателей.

Наибольшее распространение получили водогрейные системы утилизации тепла когенерационных установок – это наиболее простые и оптимальные решения, основанные на использовании пластинчатых теплообменников и котлов-утилизаторов (КУ), нагревающих сетевую воду.

Однако развитие технологий малой распределенной генерации позволило разработать и использовать паровые системы утилизации тепла - система производства пара требуемых параметров на базе паровых котлов-утилизаторов (КУ) за счет утилизации высокопотенциального тепла отходящих от когенератора дымовых газов. Также можно организовать системы утилизации смешанного типа, когда с помощью набора определенного оборудования можно получить как горячую воду стандартных параметров, так и насыщенный пар. В данном случае оптимально использовать газопоршневые установки повышенной мощности, или использовать несколько когенераторов с разным набором тепло съемного оборудования. Решения по использованию паровой системы утилизации тепла на газопоршневых установка приведены ниже.

Помимо режима когенерации с одновременной выработкой двух энергоресурсов, на газопоршневой установке можно с помощью специально установленного оборудования организовать режим тригенерации – одновременной выработки трех энергоресурсов – электроэнергии, тепла и холода.

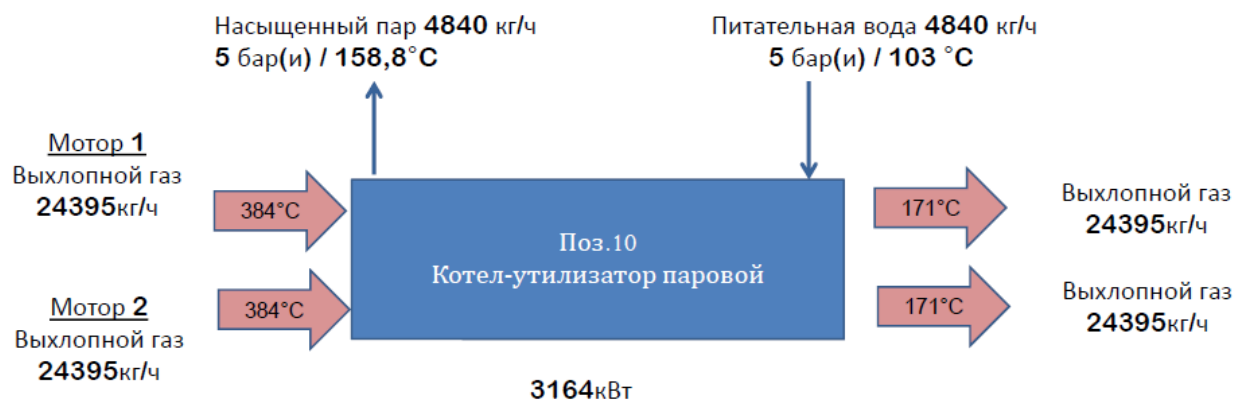


Рисунок 6 – Структурная схема технологического процесса получения пара со сдвоенного КУ

Тригенерационные установки являются очень выгодным оборудованием в сфере малой распределенной генерации, т.к. позволяют использовать утилизированное с газопоршневых установок тепло не только зимой в целях отопления, но и летом для кондиционирования помещений или охлаждения в технологических нуждах. Тем самым повышается общий КПД установки, которая в таких условиях может использоваться круглый год, сохраняя высокую эффективность.

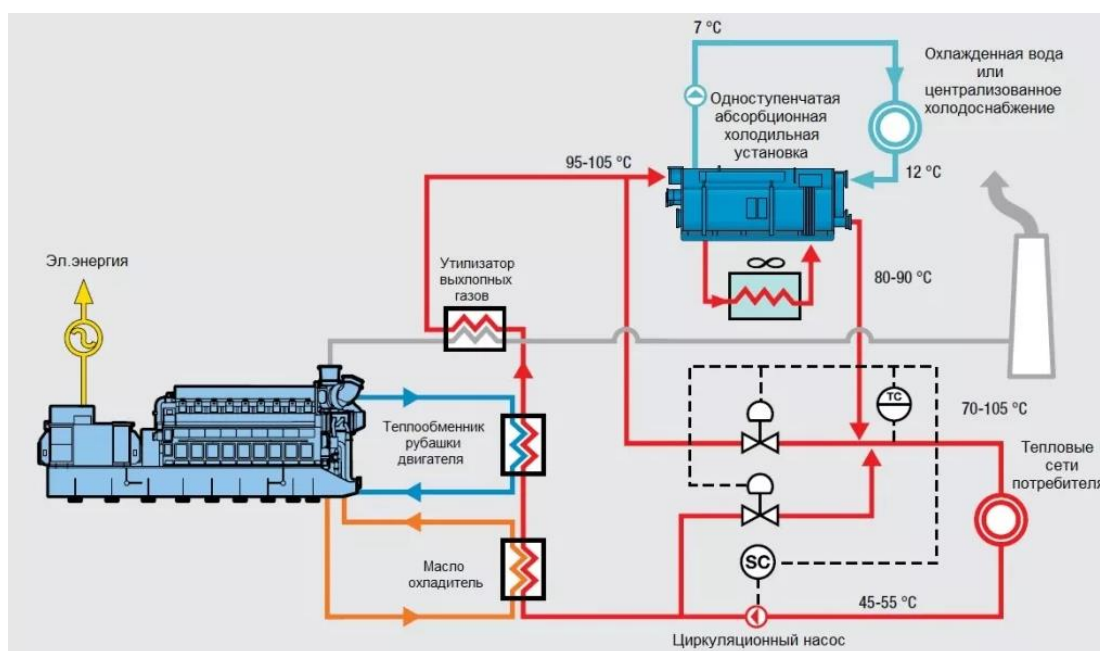


Рисунок 7 – Общая структурная схема режима тригенерации

Для целей тригенерации используются абсорбционные бромистолитиевые холодильные установки (АБХМ) - предназначенные для отбора и удаления избыточного тепла от тепловых агрегатов и поддержания заданного оптимального температурного и теплового режимов. В качестве абсорбента в них используются различные растворы. Часть тепла, утилизируемого от ГПУ, подается в АБХМ для генерации холода. Холод может использоваться как для охлаждения воды как и в системах кондиционирования, или на технологические нужды.

Когенерационные станции работают на различных видах горючего газообразного топлива. Наиболее распространенным и эффективным видом топлива является природный газ. Другие возможные виды газообразного топлива:

- свалочный газ;
- биогаз;
- попутный нефтяной газ;
- шахтный газ;
- очистной газ;
- рудничный газ;
- коксовальный газ;
- жидкий газ (пропан, СПГ) и др.

При использовании альтернативных видов газообразного топлива необходим предварительный анализ газа и проверка состава и параметров газа на соответствие требованиям завода-изготовителя.

Проекты когенерации (тригенерации) обладают целым рядом преимуществ. Основные из них следующие:

- одновременная выработка нескольких полезных энергетических ресурсов – электрическая энергия, тепло, холод при сжигании одного и того же объема топлива;
- максимальная общая эффективность установки (до 90%);

- низкий уровень себестоимости производства электроэнергии в режиме когенерации (тригенерации);
- оптимальная стоимость когенерационных установок;
- широкая линейка номинальных мощностей когенерационной установки;
- длительные межсервисные интервалы и максимальная наработка до капитального ремонта среди установок своего класса;
- компактность, возможность блочно-модульного исполнения;
- экологичность и безопасность, отвечающие европейским нормам;
- оптимальные расходы на сервисное обслуживание и эксплуатацию;
- быстрая окупаемость проектов.

Когенерационные установки повышают эффективность для предприятия потребителя в части его системы энергоснабжения. Основным экономический эффект при использовании когенерационной установки заключается в получении попутных условно бесплатных энергетических ресурсов (тепло, холод) без дополнительных затрат на топливо. Этот эффект приводит к заметному снижению себестоимости выработки электроэнергии по отношению к режиму моногенерации (только выработка электричества), когда все затраты распределяются только на один ресурс. В результате когенерации потребитель получает все вырабатываемые ресурсы значительно дешевле, чем от централизованных сетей.

Также значительным критерием в сторону когенерации является размещение генерирующего объекта в непосредственной близости от потребителя – это снижает потери при передаче и исключает наличие транспортной составляющей в стоимости энергетических ресурсов.

В связи с этим, проекты реализации газопоршневых когенерационных электростанций сейчас имеют довольно привлекательный срок окупаемости для предприятия-потребителя – до 5 лет. При этом, сроки реализации таких проектов укладываются, как правило, в один календарный год, что делает

проекты установок когенерации (тригенерации) не только доступным, но и очевидно выгодным и логичным шагом.

1.3 Описание электрических режимов электроэнергетической системы

«Режим — состояние системы, которое характеризуется показателями, количественно определяющими ее работу. Эти показатели называются параметрами режима. К ним относятся значения мощности, напряжения, тока, углов сдвига векторов э. д. с., напряжений, токов, частоты и т. д. Параметры режима связаны соотношениями, в которые входят параметры системы».

Параметры системы — это показатели, количественно определяющие физические свойства системы как некоторого материального сооружения, зависящие от схемы соединений ее элементов и принимаемых допущений. К параметрам, системы относятся значения полных, активных и реактивных сопротивлений, проводимостей элементов, собственных и взаимных сопротивлений, коэффициентов трансформации, постоянных времени, коэффициентов усиления, и т. д.

Режимы электрической системы разделяются на две большие группы: установившиеся режимы и переходные режимы, которые иногда называются неуставившимися или нестационарными.

Внутри этих групп различают следующие виды режимов:

- нормальные установившиеся — длительные режимы, применительно к которым при проектировании электрической системы определяются ее основные технико-экономические характеристики;
- нормальные переходные — режимы, во время которых система переходит от одного рабочего состояния к другому;
- аварийные — установившиеся и переходные режимы, для которых определяются технические характеристики устройств, предназначенных для ликвидации аварии, и выясняются условия дальнейшей работы системы;

– послеаварийные установившиеся — режимы, которые в общем случае характеризуются изменением нормальной схемы системы, например отключением какого-либо элемента или ряда элементов. В послеаварийном режиме система может работать с несколько ухудшенными технико-экономическими характеристиками по сравнению с характеристиками нормального режима.

В любых режимах реальной электрической системы, в том числе и в установившихся, параметры режима не постоянны, они непрерывно изменяются — отклоняются от некоторого среднего значения, но эти отклонения в установившемся режиме настолько малы, что режим может практически оцениваться как установившийся; в переходных режимах отклонения существенны.

Переходный режим в системе может иметь место и в нормальных условиях, например при производстве нормальных включений или отключений отдельных элементов системы и при относительно быстрых изменениях режима работы отдельных элементов.

При правильных операциях переходный режим в нормальных условиях быстро заканчивается переходом к несколько изменившемуся нормальному режиму работы системы. При неправильных операциях (ошибочное несинхронное включение, включение на заземленную линию) переходный «режим оказывается аварийным.

Переходный режим системы в аварийных условиях имеет место при коротких замыканиях в электрической сети и повреждениях тепломеханического оборудования, а также при нарушениях статической устойчивости, вызванных неправильным ведением режима (перегрузка линии электропередачи, необоснованное отключение каких-либо элементов сети или автоматических регуляторов возбуждения). Режим этот должен быть весьма кратковременным. Быстрая ликвидация аварийного режима не только обеспечивает большую безопасность оборудования и предотвращает развитие аварии, но и повышает надежность электроснабжения

потребителей, а также уменьшает продолжительность отклонения основных параметров режима в узловых точках системы от требуемых значений.

Последствия переходного аварийного режима зависят от характера его протекания. При кратковременности этого режима не так существенно изменение параметров режима в узловых точках системы в период самого переходного режима, как важно получение нужных величин параметров того установившегося режима, к которому система переходит после аварии, а также получение достаточной величины запаса надежности этого режима, хотя бы сниженной по сравнению с величиной запаса надежности нормального режима. Если параметры этого режима, в частности, параметры во всех узловых точках лежат в зоне допустимых отклонений и кроме того, имеется достаточный запас надежности, то такой послеаварийный режим характеризует благополучный исход аварии.

1.3.1 Требования к режимам энергетической системы

После нормального переходного или аварийного режима, благополучно заканчивающегося, система возвращается к установившемуся режиму, исходному или практически близкому к нему. Режимы электрических систем, как установившиеся, так и переходные, должны отвечать определенным требованиям, которые надо иметь в виду при проведении расчетов.

«При расчетах и осуществлении режимов электрических систем нужно учитывать, что они должны отвечать определенным требованиям, имеющим общефизический характер. Часть требований одинаково обязательна для всех систем, а часть вытекает из конкретного назначения рассматриваемых систем и устанавливается на основе практических соображений, фиксируемых обычно в так называемых нормативах. Из общефизических соображений прежде всего вытекает требование возможности существования режимов. Эта осуществимость для простейших систем легко выявляется на основе элементарных физических представлений; для сложных систем такие

свойства часто оказываются скрытыми и выявить их можно только сложными математическими построениями. Необходимым условием существования режимов является также их устойчивость. Кроме того, в любом режиме системы должны быть обеспечены требования нормативного характера, к главнейшим из которых можно отнести» [9]:

– удовлетворительное качество энергии, которой снабжаются потребители;

– достаточную надежность снабжения потребителей энергией. Потребители должны получать энергию без перерывов и без снижения ее качества;

– высокую экономичность снабжения потребителей энергией при удовлетворительном ее качестве, достаточной надежности, возможно меньших затратах средств на ее производство, передачу и распределение.

В последнее время вопросы надежности режима и бесперебойности энергоснабжения начинают рассматривать с экономической точки зрения. С точки зрения интересов народного хозяйства в целом важно обеспечить не какой-либо произвольно выбранный уровень надежности и бесперебойности энергоснабжения и, конечно, не максимально возможный ее уровень, а оптимальный по комплексной экономичности для всего народного хозяйства. Повышение надежности энергетической системы связано с определенными затратами, тем большими, чем выше обеспечиваемый уровень надежности. Повышение уровня надежности поэтому может оказаться экономически не оправданным, если возможный ущерб от того, что уровень надежности не повышен, не перекрывает стоимости необходимых для такого повышения затрат. К этому присоединяется еще следующее обстоятельство. Чем тяжелее авария, тем, как правило, меньше ее вероятность и, следовательно, тем меньше возможный ущерб от ее возникновения за достаточно длинный период времени. Поэтому защита энергетической системы от тяжелых последствий очень редких аварий с помощью дорогостоящих мероприятий не всегда может быть экономически оправдана. При определении

надлежащего уровня надежности и бесперебойности энергоснабжения в настоящее время необходимо использовать статистические материалы и методы теории вероятностей для того, чтобы выбрать уровень надежности не слишком большим, что потребовало бы нецелесообразно больших затрат, не слишком малым, что привело бы к нецелесообразно большому ущербу при авариях, а экономически оптимальным для всего народного хозяйства.

Наряду с основными общими требованиями к режиму работы системы могут быть предъявлены и дополнительные требования, имеющие в некоторых случаях существенное значение. Таковыми являются:

- форсированное сжигание некоторых видов топлива, особенно низкосортного, или, наоборот, максимальная экономия других видов топлива; большей частью эти требования носят временный характер и возникают в связи с топливной конъюнктурой;
- регулирование нагрузки гидроэлектростанций по режиму, обеспечивающему условия навигации или водоснабжения городов.

Если резюмировать все изложенное выше, то необходимо признать, что имеется и развивается новая тенденция — считать важнейшим и основным требованием к режиму работы энергосистемы, помимо естественного требования — полного удовлетворения спроса, требование наибольшей экономичности режима в широком смысле слова, включая и установление оптимального по экономичности уровня надежности и качества энергии.

Однако, имея в виду, что выбор оптимальных уровней надежности и качества энергии в настоящее время из-за несовершенства вычислительной техники приходится считать самостоятельной задачей, не связанной непосредственно с оперативным управлением режимом, можно формулировать следующие четыре основных отдельных требования к режиму энергетической системы:

- «полное удовлетворение спроса на мощность и электроэнергию в нормальных условиях;
- минимум удельной стоимости полезно отпущенной энергии;

- экономически оптимальное регулирование качества энергии;
- экономически оптимальный уровень надежности и бесперебойности энергоснабжения потребителей» [9].

Осуществление основных требований к режиму работы энергетической системы может натолкнуться на кажущиеся трудности, связанные с противоречивостью отдельных требований. Так, например, осуществлению требования к экономичности режима может противоречить осуществление требования оптимального уровня надежности. Требование к экономичности режима может противоречить и требованию поддержания надлежащего качества энергии. Поэтому важно и повить некоторые основные положения, позволяющие легко координировать осуществление всех указанных требований. Эти положения могут быть сформулированы следующим образом:

- Требования к надежности и качеству энергии легко координируются, так как поддержание надлежащего качества энергии, как правило, не снижает надежности работы энергосистемы как в нормальном, так и в аварийном режимах. Наоборот, снижение качества энергии в большинстве случаев снижает надежность работы системы.

- Наибольшая экономичность работы энергетической системы должна осуществляться не за счет снижения уровня надежности и качества энергии против оптимального значения. Это положение базируется на том, что народнохозяйственные убытки от снижения надежности работы и от снижения качества энергии обычно значительно превосходят возможную экономию, получаемую при этом в энергетических системах за счет уменьшения затрат.

1.3.2 Возникновение аварийных режимов и их классификация

Возникновение нарушений, т.е. появление непредвиденного (ненормального) режима работы энергетической системы в целом или ее части, может произойти в результате следующего:

– повреждения основного или вспомогательного оборудования: выключателей, генераторов, двигателем трансформаторов, линий электропередачи и т. п.;

– повреждения и неправильного действия коммутирующих и автоматических устройств: устройств релейной защиты, автоматики, аппаратуры вторичной коммутации и т. п.;

– повреждения и неправильного действия устройств измерений (местного и телеизмерений), обусловивших неправильную информацию, чем вызвано неправильное действие персонала;

– ошибок персонала (оперативного, ремонтного, наладочных и монтажных организаций, эксплуатационных служб);

– внешних причин (гроза, стихийные явления в виде гололеда, ветра, набросы, замыкания фаз птицами и животными);

– ошибок руководящего персонала (неправильное распределение нагрузок, непродуманный вывод оборудования в ремонт, неучет возросшего потребления и т. и.)

Эксплуатация должна быть организована так, чтобы при возникновении нарушения электроснабжение потребителей не прерывалось или такой перерыв по времени был бы минимальным и не приводил бы к существенному ущербу. Полностью исключить влияние последствий различных нарушений на работу потребителей в общем случае бывает затруднительно. Эта задача является экономической и зависит от того, насколько стоимость затрат на мероприятия для достижения повышенной надежности работы при том или другом случае нарушения нормального режима окупается выгодой от уменьшения ущерба этого нарушения. Поток событий, определяющих возникновение нарушения, является случайным, а вероятное число нарушений с той или другой степенью достоверности может быть определено, используя статистические данные, а также теорию вероятностей и методы математического анализа

Аварийность в энергетических системах во многих случаях происходит из-за недостаточной дисциплины оперативного персонала, плохого знания работы оборудования неопытности кадров, плохой профилактики, несвоевременного выполнения противоаварийных мероприятий и тренировок, включения оборудования в эксплуатацию с недоделками, несоблюдения правил технической эксплуатации электрических станции и сетей. Указанное требует от диспетчерского персонала исключительно четкой работы как при ведении нормального режима энергетической системы, так и в особенности по предотвращению возникновения нарушения и по ликвидации его последствий.

В зависимости от последствий для работы потребителей и оборудования нарушение может рассматриваться как авария или брак в работе или как прочие нарушения и потребительские отключения и погашения. Например, отключение линии электропередачи при отсутствии у потребителей резервного питания вызовет обесточение и недоотпуск электрической энергии; в зависимости от величины этого недоотпуска такое нарушение расценивается как авария или брак в работе. Из примера следует, что хотя отнесение нарушения к категориям аварии или брака является условным, сами эти категории характеризуют ту или другую степень ущерба, наносимого нарушением электроснабжения народному хозяйству.

1.4 Выводы по разделу 1

1. Существующие в мировой энергетике направления развития значительных источников и их органичное совмещение с малой генерацией энергии свойственны и для России. В большой степени этому содействует активная автоматизация систем энергетики. В комбинации немалые источники и объекты малой генерации формируют современную парадигму развития энергетики.

2. Для результативного использования технологий малой энергетики необходимо изучить виды допустимых интегрированных систем, совмещающие ряд технологий малой энергетики в группе единого генерирующего комплекса, располагающегося под единым управлением.

3. Введение локальных источников питания и объектов малой генерации сопряжено с некоторыми техническими результатами, связанными с регулированием их параметров и изменением режимов электроснабжения, организации защиты и управления.

4. Распределенная генерация в ЕЭС развивается главным образом двумя путями. Малая генерация на основе углеводородных электроустановок служит по большей части собственной генерацией потребителей тепловой и электрической энергии, работающей в составе потребительских энергосистем. Малая генерация на основе ВИЭ прогрессирует в результате государственной политики поддержки возобновляемых источников энергии, появления соответствующих производителей электроустановок на основе ВИЭ и постепенного их удешевления.

2 Влияние распределенной генерации на системы электроснабжения объектов

Внедрение малой генерации (МГ) на стороне потребителя влечет за собой внушительный технико-экономический эффект, приводящий к тенденции применения данных технологий и необходимости энергообеспечения функционирования системы энергоснабжения путем исполнения технологических и технических действий.

Промышленные результаты подсоединения связаны как с прямым добавлением вспомогательного источника активной и реактивной мощности, так и с режимом работы и топологией реорганизованной концепции электроснабжения.

Рассматривая параллельный режим работы малой генерации с центральными электрическими сетями, принимаются на усмотрение как «внешние» аспекты внедрения, связанные с различными параметрами системы внешнего электроснабжения и работой оператора системы, так и «внутренние» аспекты, связанные с параметрами и свойствами систем внутреннего электроснабжения и потребительских электрохозяйств. Разница в точках зрения проявляется как условиях и задачах, ставящиеся перед проектировщиком распределенных систем, так и в оценке параметров их функционирования. В данной связи необходимы частные и комплексные варианты рассмотрения эффектов внедрения.

2.1 Влияние на параметры режимов электроснабжения

2.1.1 Влияние на величину потерь электроэнергии.

Преимущественное основание внедрения МГ с точки зрения энергосистемы, считается уменьшение потерь электроэнергии при её передаче.

Минимизирование потерь достигается в результате расположения источников активной и реактивной энергии вблизи от конечных

потребителей, и в конечном выводе достигается уменьшение перетоков мощности на протяжении всей линии электропередачи от централизованных генерирующих станций. Как правило, распределенные генераторы, работающие в индуктивном режиме, имеют коэффициент мощности 0,85-1,0; тем не менее применяя синхронные генераторы и инвертеры применяется работа в емкостном режиме. В таком случае принцип выбора расположения МГ для уменьшения потерь электроэнергии в системе схож с принципами размещения устройств компенсации реактивной мощности.

Для уменьшения потерь в линии фидера применяют подключение распределенного генератора у потребителя, что дает положительный эффект с точки зрения потерь. Однако, требуется большая пропускная способность (например, характеристики нагрева) при значительной мощности подключаемого источника малой генерации и образовании обратных перетоков мощности от МГ. Вероятность появления таких случаев описана в [15]: при увеличении мощности МГ общей нагрузки сети в два раза, потери в распределительной сети также будут больше.

Так как расположение МГ находится в зависимости от потребителей, энергосистема, наблюдает уменьшение потерь в своих сетях, с другой стороны местные незначительные повышения перетоков мощности, способные послужить причиной нежелательных перегрузок сетевого электрооборудования. В результате программного анализа перетоков мощности нагрузок достигаются типоразмер и приемлемое расположение МГ.

Проектируя новые распределенные системы и усовершенствовании существующих, электрооборудование рассчитывается на передачу полной мощности нагрузки потребителей не учитывая размещение объектов малой генерации и распределенных энергетических ресурсов. Подобное решение обуславливается необходимостью обеспечения надежного электроснабжения объектов системы в момент отключения

распределенных энергоблоков. При «нормальной» параллельной работе МГ с централизованной системой снабжения, загрузочный коэффициент линий электропередачи становится существенно ниже расчетного. Таким образом, потери мощности напрямую зависят от полного сопротивления линии, такое «избыточное» проектирование косвенно будет способствовать уменьшению потерь.

При рассмотрении подключения МГ с точки зрения потребителя, эффект от снижения потерь при передаче электроэнергии остается не слишком существенным. Основная доля потребителей, характеризуемые как малые, желающих внедрить МГ как средство повышения надежности и обеспечения энергонезависимости, не обладают в своем наличии протяженных и разветвленных распределительных сетей. Подключение МГ для такого рода потребителей производится в основном на вводах распределительного пункта, то есть предельно близко к границе балансовой принадлежности. Следовательно, для потребителей в собственных сетях такое изменение величины незначительно и определяется интегральным изменением профиля напряжения в точке подключения баланса мощности. Тем не менее, для средних и крупных потребителей, обладающих собственными распределительными сетями, включая среднего и высокого напряжения, при подключении МГ к шинам локальных распределительных пунктов системы, эффект может быть весьма значительным. Из вышеупомянутого следует, что решающим фактором при оценке влияния МГ на потери электроэнергии сети является топология систем внутреннего электроснабжения потребителей, также к показателям данной топологии должна быть привязана оценка эффекта изменения потерь.

2.1.2 Влияние на характеристики напряжения и его регулирование

Подключение МГ оказывает влияние на характеристики напряжения в системе электроснабжения за счет некоторых причин, связанных напрямую с

самими энергоблоками и с отличительными чертами их параллельной работы с системой, координацией и синхронизацией параметров.

Параллельная работа энергоблоков входящих в систему электроснабжения подразумевает направление перетоков мощности как в сторону энергосистемы, так и в сторону нагрузки. Регулирование напряжения при однонаправленном потоке выполняется некоторыми способами: регулируемым переключением отпаяк трансформаторов (под нагрузкой или без возбуждения) и автотрансформаторов; с участием линейных регуляторов и вольтодобавочных трансформаторов; регулированием параметров СЭС; с регулированием величины вырабатываемой реактивной мощности в системе. Обеспечение работоспособности энергоблоков МГ возможно в двух режимах: регулирование напряжения и «следование» напряжению. В первом случае регулирования обозначает активное поддержание выходного уровня напряжения в контролируемой точке. Режим «следование» обозначает пассивное регулирование за счет изменения баланса мощностей в системе электроснабжения.

Из вышесказанного следует, внедрение МГ на стороне потребителя снижает нагрузку на фидерах и способствует уменьшению потерь мощности и напряжения, что в итоге приводит к ожидаемому положительному эффекту при поддержке и регулировании требуемых уровней. Поэтому, при подключении к фидерам распределенного энергоблока с установленными силовыми и вольтодобавочными трансформаторами, оборудованные автоматическим регулированием под нагрузкой (РПН), напряжение на шинах электрооборудования может снижаться за счет не совсем корректной работы систем управления. Это явление возникает в пиковых режимах работы, в результате которых, снижение чувствительности системы управления при «видимом» уменьшении нагрузки на фидере в результате подключения распределенного генератора вблизи потребителя. Показательным критерием вероятного возникновения данной проблемы считается превышение на 10%

мощности генератора над мощностью, проходящей через сетевой регулятор, соответственно более близкое расположение МГ к регулятору, чем к нагрузке. Известна пара способов решения проблемы: внедрение дополнительных устройств регулирования, «компенсирующих» данный эффект или изменение диапазона уставок и регулирования линейного регулятора, подключение малой генерации выше регулируемых трансформаторов по уровню.

Совместно с этим, установка распределенных энергоблоков в имеющиеся приводит к длительным перенапряжениям в результате изменения обратных перетоков мощности и баланса мощностей. К примеру, источник питания МГ, который подключен к силовому трансформатору, питающий определенную нагрузку, способен поднять напряжение на вторичной стороне, что создаст перенапряжение у электроприемников. Это возникает, в случае когда силовой трансформатор подключен к сети в точке с уровнем напряжения свыше фиксированного нормативного или схожим с ним. Подключая дополнительный источник и снижая потери, при отсутствующей компенсации модификации параметров существующей СЭС, осуществляется изменение баланса реактивной мощности, в следствии чего в данных условиях и для текущих параметров сети уровень напряжения будет увеличиваться. Установка источника питания МГ также сопровождается появлением обратного перетока мощности и, в какой-то степени, повышением уровня напряжения.

В преобладающую долю маломощных энергоблоков МГ входят электроустановки, подключаемые к сети с помощью инверторов, которые обеспечивают регулирование параметров МГ в контролируемой точке. Например, к таким энергоблокам относятся микротурбинные установки, генераторы на ВИЭ, солнечные электростанции. Выделяют три стратегии инверторного регулирования. Основная часть инверторных установок является источниками тока системы, работающими при коэффициенте мощности равному одному. При использовании инверторов напряжения

существует два варианта. Первый это, электроустановка может вырабатывать реактивную мощность, ограниченную поддержанием определенного коэффициента мощности и предельного значения производимой полной мощности. Во втором случае, должен обеспечиваться допустимый уровень напряжения на выходе МГ. В этом же случае возможности регулирования в системе ограничены наибольшей производимой реактивной мощностью. Тем не менее, максимальные значения напряжения могут увеличиться независимо от нагрузки регулирования параметров энергоблоков, так же может наблюдаться несоответствие локальных колебания нагрузки и генерации.

Асинхронные генераторы (АГ) находят обширное применение в технологиях МГ (газопоршневые установки, микротурбины, мини-ГЭС) в виду дешевизны и простоты, впрочем, обладают рядом недостатков, влияющих на параметры напряжения в распределенных системах электроснабжения. Главный из них является основное потребление реактивной мощности, приводящее к необходимости вспомогательного применения устройств компенсации с гибким регулированием, в особенности для снабжения потребителей с переменным графиком нагрузки сети. Использование АГ сказывается на уменьшении возможностей регулирования напряжения как средствами системы электроснабжения, так и собственными системами (что актуально для непромышленных потребителей).

Таким образом, распределенные системы электроснабжения с достаточным количеством маломощных генераторов, важной особенностью которых является допустимость частых включений и отключений потребительских установок МГ, работающих без собственных устройств регулирования и с постоянным коэффициентом мощности. В объемах распределенной системы электроснабжения, непредвиденный режим работы и несогласованность большинства эксплуатируемых рассредоточенных энергоблоков, подсоединенных к общей системе, приводит к постоянному изменению параметров системы и нагрузок ближайших потребителей в ее составе и, как итог, необходимости адаптивного регулирования уровня

напряжения в сети. Для действующих систем возможен пересмотр принципов и способов регулирования.

Исходя из этого, выбор технологии источников питания МГ оказывает значительное влияние на параметры уровня напряжения в системе, также это вызывает необходимость пересмотра методик, коррекции уставок, уровней регулирования напряжения и утверждение автоматических систем управления и защиты, изменение компенсации реактивной мощности.

2.1.3 Влияние на параметры качества электроэнергии

1) Несинусоидальность напряжения

Вместе с электрооборудованием потребителей, МГ является источником высших гармонических составляющей кривую напряжения. Высшие гармоники вырабатываются непосредственно в самом генераторе или в силовом электрооборудовании: выпрямителях, инвертерах.

Инвертеры применяются для подключения многих МГ, основанных на объектах малой генерации, ВИЭ, а также топливных элементов. Вклад инверторов в гармонический состав отчасти обусловлен полупроводниковыми управляемыми вентилями, предоставляющими в сеть высокий уровень высших гармоник. В настоящий период, решением проблемы является использование инверторов, построенных на базе IGBT-транзисторов, применяющих широтноимпульсную модуляцию для построения «чистой» синусоидальной кривой.

Вращающиеся генераторы это один из других источников высших гармоник; их возможность производить гармоники зависит от нескольких факторов: типа обмоток (шага обмотки), заземления, нелинейности магнитопровода (сердечника) и других факторов, влияющих на распространение гармоник.

Рассматривая различные типы обмоток генераторов, отмечается, что оптимальной конфигурацией является таковая с шагом $2/3$, представляющаяся

наименьшим производителем третьей гармоники, которая достаточно часто превалирует в составе. Однако, обмотки с шагом $2/3$ обладают меньшим полным сопротивлением и могут являться основанием большего гармонического тока, протекающего через другие источники, которые работают параллельно. Исходя из этого, заземляющие установки повышающих трансформаторов и генераторов имеют главное значение в ограничении распространения гармоник по фидеру. Системы заземления выбираются в целях снижения доли третьей гармоники в системе электроснабжения. Это приводит к ее выделению только на стороне МГ. Для данной задачи на практике используется соединение обмоток трансформаторов в треугольник Δ , для вариантов бестрансформаторного подключения МГ к сети — использование разделительных трансформаторов с обмотками Y/D.

Привычно, влияние МГ на гармонический состав не так уж обширно в сравнении с остальными элементами проблемы. Тем не менее, появляется ряд проблем, относящихся к резонансу с батареями конденсаторов или с взаимодействием с электрооборудованием, чувствительным к гармоникам. В наихудшем случае, МГ придется вывести из работы вследствие перегрева электрооборудования токами высших гармоник.

Согласно стандарту IEEE 519-2014, а также стандарту подключения МГ IEEE 1547, к распределенным генераторам применимы соответствующие требования (таблица 1).

Таблица 1 – Основные требования к гармоническому составу выходного тока генераторов

№ гармоники, h	Допустимое значение по отношению к первой (для нечетных гармоник), %
$h < 11$	4
$11 < h < 17$	2
$17 < h < 23$	1,5
$23 < h < 35$	0,6

$h > 35$	0,3
Суммарный уровень гармонического искажения	5

Границы гармонического искажения кривой напряжения составляют около 6% для суммарной несинусоидальности и 3% для любой отдельной гармоники.

2) Отклонения и колебания напряжения

Основным фактором возникновения колебаний уровня напряжения при введении МГ считаются источники питания с прерывистыми характеристиками, к которым относятся ВИЭ и фотоэлектрические генерирующие устройства. Колебания уровня напряжения в распределенных системах электроснабжения тоже являются результатом мгновенных сбросов и подъемов нагрузки.

Провалы уровня напряжения при работе МГ наблюдаются по причине непостоянности графика вырабатываемой мощности энергоблоков с ветряными электростанциями, так и в случае применения электроустановок с асинхронными двигателями, потребляющими существенную реактивную мощность при запуске. Из вышесказанного, решением этой проблемы считается подключение статических компенсаторов с гибким регулированием. Еще одним основанием провалов является работа системной автоматики (АПВ, АВР) при переключениях между распределенным и централизованным электроснабжением системы.

Вопрос колебаний уровня напряжения может быть решен с помощью увеличения мощности энергоблоков, управлением производства активной и реактивной мощности и активным регулированием напряжения, к тому же использованием накопителей энергии для ВИЭ, которые сглаживают возмущающие действия в энергосистеме. Другим вариантом решения, предложенным в [11], служит строительство гибридных энергоблоков МГ, сочетающих, наряду с накопителями ЭЭ, электроустановки с

возобновляемыми и невозобновляемыми источниками энергии. Так же подразумевается использование общей системы регулирования, использовании общего преобразователя, допускающих гарантировать высокое качество электроэнергии. Возможно также использование экстенсивных методов, к которым принадлежит увеличение пропускной способности распределительных сетей, а именно - за счет замещения проводников с целью уменьшения потерь в сети, вдобавок выделение МГ на отдельную линию для питания определенного потребителя.

3) Несимметрия напряжения

Основная часть маломощных однофазных генераторов, основанных в большей степени на технологиях ВИЭ (фотоэлектрических и ветровых), в распределенных сетях становится причиной несимметрии уровня напряжения.

В особенности эта ситуация актуальна для отдаленных районов в приоритете частных домохозяйств, гражданских потребителей.

2.2 Влияние на работу систем защиты и автоматики и координацию устройств

2.2.1 Организация подключения МГ в точке общего сопряжения

Результат положительного эффекта улучшения качества и надежности электроснабжения системы при внедрении МГ допустимо только при соответствующей организации и согласования действия защитных устройств в месте общего сопряжения со стороны сети и со стороны энергоблока. Согласно правилам защита присоединения должна принимать во внимание обе стороны при обеспечении выполнения условий энергосистемы.

Защита присоединения МГ находится в зависимости от типа и размеров энергоблока, также его схемы присоединения к системе и подсоединения трансформатора связи.

Характеристики и схемы соединения энергоблоков малой генерации и трансформаторов связи согласовываются с внешней энергосистемой. Неисполнение условий приводит к появлению перенапряжений, приводящих к выходу из строя системного оборудования и электроприемников потребителей. С основной стороны (первичной) системы тип вводимого трансформатора обуславливает значительное влияние на характеристики заземления в энергосистеме, представляющий собой заземленный источник. Из-за этого, необходимо, чтобы трансформатор обладал заземляющим контуром, от обмотки низкого напряжения к обмотке высокого напряжения.

Обычно определяющей схемы соединения обмоток трансформатора для подключения МГ нет, подбор определяется проектировщиком и условиями электрохозяйства. Как правило в низковольтных сетях используют схемы (МГ/СЭС) Δ/Y_0 , Y_0/Y_0 ; в сетях 6-20 кВ в основном применяется соединение обмоток А, поэтому в большей степени распространенными считаются схемы Y_0/Δ , А/Δ.

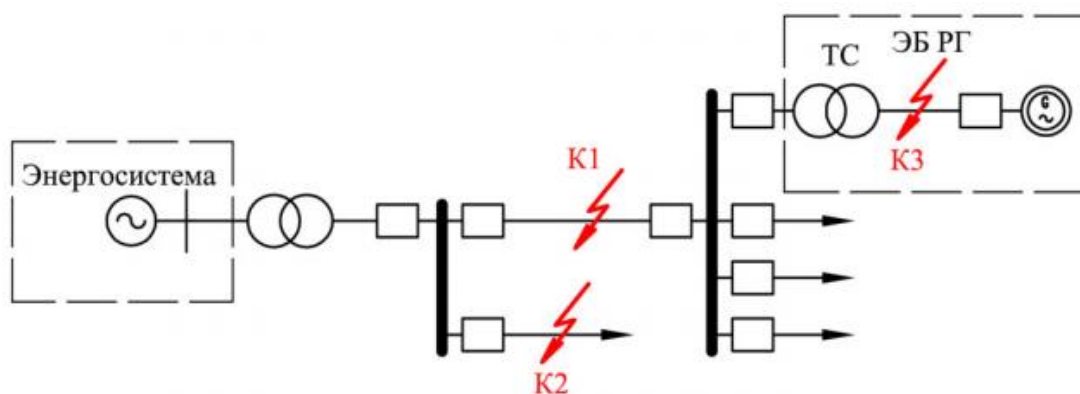


Рисунок 8 – Схема присоединения МГ через трансформатор

Схема соединения обмоток трансформатора связи оказывает воздействие на подбор модели реализации схемы защиты от автономизации МГ, что гарантируется необходимостью ликвидации подпитки К3 токами прямой и нулевой последовательностей.

Таблица 2 - Преимущества и недостатки схем соединения трансформаторов связи МГ

	Схема соединения	Вторичная (РГ)	
	Первичная (ЭС)	Y _o	Δ
Преимущества	Y _o	Не возникает перенапряжение при к/з на землю в К1	Отсутствие подпитки к/з в КЗ от токов нулевой последовательности (через землю) от ЭС. Не возникает перенапряжение при к/з на землю в К1.
Недостатки		Срабатывание защиты В1 на стороне ЭС при к/з к КЗ	Возникновение нежелательных токов нулевой последовательности (через землю) при к/з в К1 и К2
Преимущества	Δ, Y	Не возникает подпитка тока замыкания на землю для замыканий К1 и К2. Отсутствие подпитки к/з в КЗ от токов нулевой последовательности от ЭС.	
Недостатки		Перенапряжения на шинах потребителей при автономизации РГ в результате к/з на землю.	

Для предоставления безопасной работы системы, защита базируется на следующих моментах:

- Удовлетворение требований параллельной работы МГ и системы, синхронизацию при включении и гарантирование отключения МГ;
- Защита энергосистемы от токов КЗ и переходных перенапряжений, создаваемых МГ при аварийных режимах в СЭС;
- Предохранение МГ от вероятных угроз при неработоспособности в энергосистеме, таких как автоматическое повторное включение, которые

могут вызвать повреждения в зависимости от типов применяемых генераторов малой генерации;

– Обеспечение допустимых характеристик системы электроснабжения и балансов мощностей в точке сопряжения.

Защита генераторов МГ в основном располагается в самих электроустановках; стандартным функционалом таких приборов является установление местоположения внешнего короткого замыкания и аварийных условий работы непосредственно самого генератора (обратное направление мощности, перевозбуждение генератора, несимметрия токов).

Настройка релейной защиты и автоматики межсистемного соединения в малой генерации, как правило, обязана включать в себя соответствующие элементы, определяемые в и уточняемые в соответствии правилам системного оператора (СО) ЭС:

– «Целенаправленная защита от обратных перетоков мощности в сети, объясненная ненормальными перетоками по направлению в энергосистемы, запретными СО во множестве случаев;

– Направленная токовая защита для определения и локализации коротких замыканий;

– Максимальная токовая защита;

– Максимальная/минимальная защита по напряжению и частоте – основные методы для определения изолированной работы МГ и предотвращения отключения потребителей;

– Средства защиты от автономизации МГ в аварийных режимах, включая средства определения подпитки токов КЗ от МГ;

– Проверка синхронизации по напряжению - применяется для обеспечения безопасного подключения на параллельную работу при повторном включении одного из источников (как централизованного, так и распределенного), используется как резервный элемент в виду, ухудшения показателей надежности и качества электроснабжения, вызванного увеличением времени восстановления;

– Защита от обратной последовательности и неполнофазных режимов - применяется для исключения негативного влияния токов обратной последовательности на установки МГ;

– Ограничение нагрузок с целью обеспечения допустимого баланса мощностей генерации и потребления и ограничения эффектов от его нарушения (отклонений напряжения и частоты), в том числе, при автономном работе МГ;

– Автоматическое включение резерва, применяемое для обеспечения полноценного электроснабжения потребителей при отключении одного из источников питания» [43].

2.2.2 «Автономизация» объектов малой генерации

Аварийным режимом, требующим стремительного определения и локализации, считается переход МГ на изолированную эксплуатацию, или «автономизация» МГ.

Изолированной или автономной, «островной» эксплуатацией распределенного генератора именуется состояние, при котором один или несколько энергоблоков продолжают питать часть системы электроснабжения при обособлении ее от централизованной системы. Автономный режим способен поддерживать свое состояние при условии, если генераторы могут гарантировать питание нагрузки в изолированной области.

«Переход на островной режим работы возможен в результате отключения выключателей на линиях сети, срабатывания предохранителей, работы устройств секционирования на подстанциях. Эта ситуация вредна и усложняет эксплуатацию, в особенности если линии оснащены автоматикой повторного включения (АПВ). Результат работы АПВ во многих случаях зависит от гашения дуги и самоустранения неустойчивого КЗ в течение бестокового периода, однако присутствие МГ может приводить к

сохранению КЗ постоянным, так как источники питания поддерживают напряжение и препятствуют правильному эффекту от работы. В связи с этим требуется усложнение защиты и увеличение времени работы: необходима перестройка уставок АПВ по времени, направленная на увеличение «мертвого» периода, чтоб дать возможность связующему выключателю МГ определить пропадание основного источника и сработать за счет реле минимального напряжения; подключение синхронизирующего устройства (реле проверки синхронизма), которое проверяет отсутствие напряжения на стороне нагрузки головного выключателя, что в итоге является лучшим решением, по сравнению с увеличением времени работы АПВ. Такие алгоритмы позволяют эффективно избегать работы в островном режиме, но ведут к необходимости серьезных инвестиций в системы коммуникации от потребителей МГ для обеспечения работы необходимых методов» [38].

Помимо этого, при изолированном режиме работы, за счет серьезного снижения ресурса вырабатываемых мощностей, случается значительное снижение качества электроэнергии и электроснабжения, проявляющееся в провалах напряжения и частоты, колебаниях, снижении надёжности. В особенности заметен этот эффект в маломощных системах с энергоблоками МГ. В итоге автономизации распределённой системы, из-за внезапного отключения питающего сегмента ЦЭС, совершается внезапное изменение баланса мощности, которое сопровождается потерей устойчивости системы электроснабжения, приводящей к лавинообразному перемене напряжения и частоты.

Автоматическое повторное включение линий, запитанных от МГ через ТЭС в изолированном режиме, приводит к возникновению перенапряжений и, как следствие, повреждениям электрооборудования. Не стоит забывать и про опасность для оперативного и ремонтного персонала, работающего на якобы поврежденной и отключенной линии в то время, как она находится под напряжением от источников МГ и РР.

«Автономизация распределенной СЭС может быть преднамеренной, обусловленной технологической необходимостью (оперативными переключениями с целью повышения качества и надежности электроснабжения), и непреднамеренным, обусловленным аварийным или другим неумышленным отключением централизованного источника» [38].

На данный момент методы предотвращения и выявления автономизации системы электроснабжения базируются на измерении выходных параметров объектов малой генерации и делятся на две основные категории: местные и удаленные. Местные делятся на активные и пассивные.

«Удаленные методы выявления автономизации основаны на взаимосообщении между СЭС и МГ; они обладают большей надежностью, чем местные, но требуют достаточно крупных капиталовложений. К таким методам можно отнести удаленное отключение МГ при работе (отключении) головного выключателя питающей линии. Являясь достаточно простым и прямым, метод осложняется распределенным характером рассматриваемых систем, который часто выражается в удаленном расположении и сопутствующих проблем коммуникации. Современные телекоммуникационные стандарты, например IEC 61850, позволяют осуществлять передачу сообщений и команд по Ethernet, что существенно упрощает настройку сообщения и устройств автоматики и защиты; применяются механизмы управления GOOSE (Generic Object Oriented Substation Events) для мгновенного управления присоединением РГ» [42].

Местные техники основаны на измерении различных параметров системы в месте расположения МГ. Активные методы напрямую взаимодействуют с системой, в то время как пассивные основаны на определении проблемы по полученным в результате измерений параметрами, утилизируют поступающую информацию об изменениях (напряжения, частоты и тока) с целью принятия дальнейших решений.

Пассивные методы определения автономизации быстры и не вносят ощутимых изменений в систему, однако обладают большой «мертвой зоной», в которую, например, попадает работа изолированной распределенной СЭС при балансе потребляемых мощностей нагрузки и генерируемых МГ.

Проблема баланса не касается активных методов, так как их действие основано на внесении в систему небольших помех, которые незаметны в режиме работы РГ параллельно с сетью, но ощутимы при автономизации.

Использование той или иной методики определения и предотвращения автономизации, согласно, обуславливается размером и типом генераторов, схемой межсистемного соединения в ТОС, а также уровнями токов подпитки КЗ в различных режимах. С учетом особенностей функционирования распределенных систем при варьировании этих параметров, для обеспечения корректного функционирования электроснабжения и повышения бесперебойности необходимо уточнения реализации алгоритмов отключения и восстановления МГ при параллельной работе с централизованной энергосистемой.

Основными средствами обеспечения защиты при автономизации МГ являются :

- Направленная защита от обратных перетоков мощности;
- Максимальная и минимальная защиты по напряжению и частоте;
- Специальные средства защиты от токов нулевой последовательности для устранения подпитки КЗ на землю;
- Средства ограничение нагрузок;
- Проверка синхронизации по напряжению.

При возникновении изолированного режима работы, обусловленного отключением централизованного источника электроснабжения, энергоблок МГ также должен быть изолирован от системы электроснабжения для обеспечения корректной работы системной автоматики, а после вновь включен на параллельную работу. Это может быть реализовано с помощью

комплексного использования вышеприведенных средств на основе рекомендаций.

2.3 Влияние МГ на работу защитных устройств и систем централизованной системы

В общем случае внедрения МГ приоритет работы средств защиты и автоматики централизованной системы выше, что сказывается на методике построения межсистемной автоматики.

При типичном радиальном подключении МГ в распределительной системе потребителя происходит перераспределение перетоков мощности в нормальном режиме и токов подпитки коротких замыканий в аварийном (как это показано на рисунке (2)). Это сопровождается потерей селективности работы, ложными срабатываниями или несрабатываниями защит. Возникает необходимость изменения уставок на линиях ЭС, непосредственно связанных с ТЭС. Снижение влияния МГ возможно при применении адаптивных алгоритмов построения защит.

«При включении МГ на параллельную работу с энергосистемой происходит нарушение работы автоматики повторного включения на линиях, отражающееся в некорректности ее работы и необходимости увеличения установок в сторону большей продолжительности бестокового периода. Кроме того, её увеличению также способствует работа автоматики по проверке синхронизации по напряжению и фазе, обеспечивающая минимизацию отрицательного воздействия переходных процессов при включении источников на параллельную работу при временном перерыве электроснабжения от одного из них (в частности, автономизации МГ). Таким образом, внедрение МГ отрицательно сказывается на качестве электроснабжения с точки зрения продолжительности вынужденных перерывов при возникновении

самоустраняющихся аварийных режимов. При наличии определенных требований и указаний по продолжительности без токовых периодов при работе АПВ, точная автоматическая синхронизация используется в качестве резервного средства» [47].

С целью ограничения обратных перетоков мощности по направлению в энергосистему защита межсистемной связи со стороны ЭС часто обеспечивается установкой направленной защиты, а также защиты нулевой последовательности.

2.3.1 Мероприятия и рекомендации по обеспечению функционирования и присоединения МГ при внедрении в системах электроснабжения объектов

Мероприятия по обеспечению функционирования и присоединения локальных источников питания при параллельном режиме работы можно разделить на две группы:

– Экстенсивные мероприятия, направленные, преимущественно, на реконструкцию существующих СЭС и изменение их физических параметров за счет замены отдельных элементов и изменения конфигурации схем соединений;

– Интенсивные мероприятия, связанные с изменением алгоритмов работы и регулирования, применением устройств контроля и управления с целью обеспечения требуемых характеристик на базе существующего сетевого электрооборудования.

Реализация интенсивных мероприятий является основой организации подключения МГ в ТЭС в виду их технологичности и адаптивности, однако это может сопровождаться значительными капиталовложениями и в координации с системным оператором в виду необходимости ответной модификации систем управления ЦЭС, а также согласования алгоритмов и параметров.

Частными примерами экстенсивных мероприятий является изменение полного сопротивления цепи питания электроприемников в режиме КЗ за счёт

включения реакторов и разделительных трансформаторов, замена электрооборудования в соответствие с обновлёнными характеристиками. Стоит понимать, что локальное воздействие на конкретный показатель СЭС или режима ее работы может привести к ответному изменению других характеристик, что порождает необходимость комплексной оценки мероприятия в параметрических и топологических условиях рассматриваемой распределённой системы.

«С учетом описанного выше многогранного влияния на системы электроснабжения и их характеристики, подробному рассмотрению подлежит

оценка комплексного эффекта внедрения ЭБ МГ в СЭС потребителей, направленная на обеспечение структурной оптимизации параметров и режимов функционирования распределённых систем с точки зрения обеспечения технической совместимости с действующими и проектируемыми системами электроснабжения и электропотребления, повышения надежности и качества электроснабжения, а также достижения максимальных технико-экономических показателей при эксплуатации электрохозяйств потребителей» [25].

2.4 Выводы по разделу 2

1. Влияние на параметры режимов электроснабжения выражено в сложностях регулирования профиля напряжения и координации с принципами и устройствами управления в централизованных энергосистемах, а также в комплексе вопросов, связанных с изменением направления перетоков мощности и изменении параметров аварийных режимов при подключении МГ.

2. Влияние на параметры качества электроэнергии и режимов электроснабжения обусловлено технологией применяемых распределённых источников энергии и схемами их подключения, а также физическими вопросами подключения источника ЭЭ в непосредственной близости от потребителя, его регулированием и оперативным управлением.

3. Влияние МГ на работу систем защиты и автоматики обусловлено перераспределением перетоков мощности при параллельной работе МГ с ЦЭС в нормальном и аварийных режимах, нарушениями функционирования устройств и алгоритмов ввиду подключения дополнительного источника питания в зоне их действия. Отдельным вопросом согласования работы местной и сетевой автоматики является автономизация МГ, оказывающая непосредственное влияние на правильность и надежность отдельных устройств и СВЭС потребителей в целом.

4. При обосновании и реализации проектов внедрения объектов МГ в СЭС потребителей необходимо уделять внимание определению технической совместимости, обеспечению правильного функционирования распределенных систем, координации с ЦЭС и системой внутреннего электроснабжения, повышению надежности и качества электроснабжения, достижению оптимальных эксплуатационных показателей. Для проведения технико-экономического обоснования с учетом выполнения этих задач целесообразно использовать комплексный показатель, учитывающий основные факторы многогранного влияния вновь подключаемых энергоблоков.

3 Моделирование режимов работы объектов малой распределенной генерации в программном комплексе для моделирования энергосистем PSCAD

3.1 Описание программного комплекса для моделирования энергосистем PSCAD

Моделирование энергетических систем в реальном времени приобретает все большее значение по мере усложнения моделей и систем. Анализ энергосистем является наиболее распространенным видом моделирования, используемым для целей планирования электроэнергетическими компаниями. Инструменты моделирования анализа энергосистем используются для таких исследований, как поток нагрузки, уровень неисправности, динамическая устойчивость и гармоники. Для оценки тепловой нагрузки, профиля напряжения и установившейся реактивной способности сети в заранее определенных условиях проводится стационарный анализ, такой как исследование потока нагрузки и уровня неисправности. Динамический анализ предполагает проведение исследований во временной области для понимания того, как сети и их компоненты реагируют на возмущения. Это включает в себя такие исследования, которые направлены на понимание возможностей восстановления генератора в случае неисправности. Гармонический анализ проводится, как правило, для нового соединения, чтобы определить его вклад в общее гармоническое искажение, и если оно усиливает какие-либо резонансные частоты.

EMT (электромагнитный переходный процесс) - анализ предполагает детальное представление оборудования энергосистемы для обеспечения точности и достоверности моделей для исследования в частотной области. Исследования EMT включают в себя исследования молний и коммутации для координации изоляции.

Для этих исследований может быть использован любой из инструментов семейства EMTP (программа электромагнитных переходных процессов), например ATP-EMTP или PSCAD/EMTDC. EMTDC — это двигатель электромагнитного переходного решения для семейства продуктов PSCAD. В дополнение к анализу EMT HVAC (высоковольтного переменного тока), PSCAD также широко используется для моделирования устройств HVDC (высоковольтного постоянного тока) и FACTS (гибкой системы передачи переменного тока), включая проектирование систем управления HVDC и моделирование субсинхронного резонанса (SSR).

PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) – это мощный и гибкий графический пользовательский интерфейс для всемирно известного программного продукта EMTDC для моделирования электромагнитных переходных процессов. PSCAD предоставляет пользователю возможности осуществлять схематическое построение цепей, выполнять моделирование, анализировать результаты и управлять данными в полностью интегрированной графической оболочке. Также имеются элементы отображения графиков, управляющих элементов и измерительных приборов, которые дают пользователю возможность изменять системные параметры в процессе симуляции и наблюдать реакцию, не дожидаясь окончания моделирования.

В комплекте с PSCAD поставляется библиотека предварительно запрограммированных и протестированных элементов, включающая в себя как простые пассивные элементы, так и сложные модели электрических машины, гибкие системы передачи переменного тока FACTS, воздушные и кабельные линии электропередачи. Если требуемая модель отсутствует, то PSCAD предоставляет возможности для построения пользователем собственных моделей элементов. Такие пользовательские модели могут быть созданы путем соединения существующих элементов в схему или путем создания элементов с нуля в специальной гибкой среде разработки. Библиотека элементов PSCAD содержит следующие элементы:

- резисторы, индуктивности, конденсаторы;
- обмотки с взаимоиндукцией, такие как трансформаторы;
- частотно зависимые воздушные и кабельные линии электропередачи (в том числе наиболее точная модель линии электропередачи во временной области);

- источники тока и напряжения;
- переключатели и выключатели;
- реле защиты;
- диоды, тиристоры и запираемые тиристоры;
- аналоговые и цифровые функции управления;
- машины переменного и постоянного тока, возбудители, регуляторы, стабилизаторы и модели инерционных сил;

- измерители и измерительные функции;
- средства управления переменным и постоянным током;
- системы управления HVDC, SVC, FACTS;
- ветровые установки, турбины и их регуляторы. PSCAD и EMTDC имеют более чем 40-летнюю историю развития и постоянно вдохновляются новыми идеями и предложениями от пользователей по всему миру.

PSCAD используется для планирования, проектирования, эксплуатации, подготовки тендерной документации, при преподавании и проведении научных исследований. Ниже приведены некоторые примеры исследований, для которых обычно используется PSCAD:

- исследования аварийных ситуаций в сетях переменного тока, включающих в себя вращающиеся электрические машины и возбудители, регуляторы частоты вращения, турбины, трансформаторы, воздушные и кабельные линии электропередачи, различные виды нагрузок;

- анализ работы релейной защиты;
- исследования процессов насыщения трансформаторов;
- согласование изоляции трансформаторов, выключателей и разрядников;

- импульсное тестирование трансформаторов;
- исследование под синхронного резонанса сети и электрических машин, линий электропередачи постоянного тока (HVDC);
- анализ гармонических составляющих и выбор оптимального фильтра;
- разработка системы управления и согласование силовых полупроводниковых установок: FACTS, HVDC, STATCOM, VSC и преобразователей частоты;
- исследование новых решений и концепций систем управления;
- исследование ударов молний, неисправностей при работе выключателя;
- изучение сверхбыстрых процессов с крутыми фронтами;
- разработка полностью электрических кораблей;
- исследование эффекта пульсации в сетях с дизельными генераторами и ветровыми турбинами.

3.2 Моделирование режима влияния РГ на потери сети

Внедрение электроустановок распределенной генерации разгружает электрическую сеть, снижая потери мощности и энергии в сети, повышает надежность ЭЭС. Тем не менее, распределенная генерация оказывает спорное влияние на качество электроэнергии. В одном случае, наличие электроустановок распределенной генерации позволяет поддерживать уровни напряжений сети, минимизировать несимметрию и гармонические искажения. В другом случае, генераторы малой мощности способны вызывать колебания напряжения, приводящие к возникновению фликера. Появление фликера как правило, происходит при быстром снижении напряжения в узле подключения установки РГ; так же использование регуляторов напряжения у генераторов значительно затруднить ситуацию, в особенности если регуляторы не настроены должным образом. При

обширном внедрении установок МГ важна точная оценка их влияния на электрическую сеть, что позволит избежать ухудшения качества электроэнергии. Из-за этого появление вопросов возникновения и устранения фликера в электрических сетях с электроустановками РГ имеет высокую актуальность. Гарантия качества ЭЭ состоит в степени соответствия ее параметров их установленным значениям. Колебания напряжения являются одним из показателей качества электрической энергии. Они вызываются потребителями электроэнергии, имеющими электрическую нагрузку резко переменного характера. Уровень допустимых кондуктивных помех нормируется стандартами. В действующем ранее стандарте и ГОСТ 13109-97 колебания напряжения характеризовались двумя показателями: размахом изменения напряжения и дозой колебаний (дозой фликера). Расчет размахов изменения напряжения проще, чем расчет дозы фликера. С введением в 2014 году в действие введен ГОСТ 32144-2013, в котором колебания напряжения характеризуются только одним показателем – дозой фликера. По этой причине на данный момент появилась потребность анализа дозы фликера, вызываемой деятельностью различных потребителей с резкопеременной нагрузкой, значением электромагнитной совместимости по колебаниям напряжения в сети.

«Метод уменьшения фликера напряжения и его эффективность зависят от многих факторов и могут быть довольно сложными задачами. Самым простым способом снижения его влияния в таком случае будет требование к владельцу РГ сократить количество запускаемых источников. Если РГ взаимодействует с сетью через преобразователь, то относительно легко достичь уменьшения пусковых токов. В частности, потенциальными причинами фликера напряжения в ветроэлектростанциях считались изменение скорости ветра или изменение выходной мощности. Однако в конструкции современных ветротурбин внесены изменения, позволяющие эффективно избегать больших колебаний мощности в течение короткого периода времени» [26].

Неоднозначно и влияние распределенной генерации на качество электроэнергии по уровням напряжений. С одной стороны, наличие распределенной генерации в распределительной сети позволяет более стабильно поддерживать уровни напряжений в узлах за счет возможностей этих генераторов по генерированию, в отличие от традиционных распределительных сетей, в которых потери напряжения тем больше, чем дальше от питающей подстанции высокого напряжения. С другой стороны, появляется фликер. Характерно, что фликер развивается при резком снижении напряжения в узле присоединения малого генератора, особенно если генератор асинхронный.

Одним из основных последствий распределенной генерации являются потери в фидере. Размещение блоков РГ является важным критерием, который должен быть проанализирован, чтобы иметь возможность достичь лучшей надежности системы с уменьшенными потерями. Внедрение распределенной генерации уменьшает ток, проходящий через линию электропередачи, уменьшая, таким образом активную, а также реактивную потери мощности.

Тогда можно выделить несколько вариантов внедрения РГ следующее:

- РГ всегда приведет к уменьшению потерь на всех линиях в распределительной сети;

- РГ может привести к увеличению потерь на некоторых линиях, но общие потери в распределительной сети уменьшатся;

- РГ может привести к увеличению потерь на некоторых линиях, но общие потери в распределительной сети будут снижены, пока общий объем РГ будет меньше общей нагрузки в распределительной сети примерно в два раза.

Если РГ превышает примерно в два раза общую нагрузку в распределительной сети, то потери в распределительной сети будут больше при РГ, чем без нее.

«В системе распределения колебания напряжения возникают при изменении тока нагрузки, протекающего через резистивные и реактивные сопротивления линий. Колебания напряжения в распределительных сетях без РГ вызваны изменением во времени активных и реактивных нагрузок в распределительной сети. Колебания, как правило, бывают большими к концу линии из-за высокого сопротивления линии. Кроме того, колебания напряжения более существенны, если нагрузка сконцентрирована в конце системы (радиальные сети). На практике для типовых распределительных сетей расстояние, прежде чем падение напряжения превысит допустимое отклонение от номинального значения, составляет всего несколько километров. Однако линии, как правило, не предназначены для работы при таких уровнях нагрузки» [25].

РГ может влиять на колебания напряжения в двух направлениях:

1. РГ осуществляется в соответствии с требованиями локальной нагрузки. Это означает, что при росте локальных нагрузок в распределительной сети производство энергии РГ также увеличивается и наоборот. В данном случае, РГ способствует сокращению различий между максимальным и минимальным уровнями напряжения по сравнению с ситуацией без РГ. Этот режим работы РГ не создает никаких проблем для традиционного подхода регулирования напряжения.

2. «Выходная мощность РГ регулируется независимо от величины локальной нагрузки. Этот режим контроля осуществляется, если РГ управляется при помощи оценки сигналов, которые могут или не могут соответствовать локальным колебаниям нагрузки, или технология РГ зависит от наличия природных ресурсов, таких как солнечная энергия или энергия ветра. В этом случае РГ может негативно повлиять на возможность регулирования напряжения сети за счет увеличения разности между максимальным и минимальным уровнями напряжением по сравнению с ситуацией без РГ. Это происходит вследствие того, что минимальный уровень напряжения может оставаться неизменным, например, при ситуации

с повышенной нагрузкой без РГ, а максимальный уровень напряжения может увеличиться, например, при ситуации с низкой нагрузкой и РГ» [25].

«Теоретически РГ на основе преобразователей энергии могут быть использованы для уменьшения величины отклонений напряжения. В этом случае преобразователь должен выступать в качестве статического компенсатора реактивной мощности и динамического восстановителя напряжения. В принципе может быть разработан силовой электронный преобразователь, работающий в этих режимах, однако в настоящее время большинство преобразователей РГ не способны выполнять эту задачу. Основное условие заключается в том, что РГ должна обладать достаточной мощностью, чтобы компенсировать падения напряжения и поддерживать допустимый уровень напряжения во время резкого изменения нагрузки» [42].

Одним из важнейших факторов, влияющих на стабильность напряжения, является способность РГ соответствовать потреблению реактивной мощности (реактивной нагрузке и потерям). Таким образом, основное влияние РГ на стабильность напряжения в сети будет определяться углом мощности распределенного генератора. Рассмотрим теперь источники РГ с точки зрения их влияния на стабильность напряжения сети, т.е. их способность генерировать реактивную мощность.

«Синхронные генераторы способны как генерировать, так и потреблять реактивную мощность. Таким образом, использование в качестве РГ перевозбужденных синхронных генераторов позволит обеспечить производство реактивной мощности на месте. Местная генерация реактивной мощности снижает ее перетоки от источника, тем самым уменьшая связанные с этим потери и отклонения напряжения. Как следствие, также улучшается стабильность напряжения» [42].

3.3 Моделирование режима влияния РГ на токи короткого замыкания

Внедрение распределенной генерации в сеть оказывает непосредственное влияние на уровни короткого замыкания сет, оно вызывает увеличение токов КЗ по сравнению с нормальными сетевыми условиями, при которых подстанция является единственным генерирующим узлом. Это увеличение будет получено даже в том случае, если РГ имеет небольшую генерирующую мощность. Вклад распределенной генерации в уровень токов КЗ зависит от некоторых факторов, таких как генерирующая мощность РГ, расстояние РГ от места повреждения и тип РГ. Рассмотрим случай, когда один малый источник распределенной генерации встроен в систему, ток КЗ будет увеличен в различных местах повреждения, и его можно обобщить в любом месте повреждения сети, но процентное увеличение тока КЗ, вызванное присутствием одного малого объекта РГ, не может быть серьезным в той степени, которая вызывает влияние на схему защиты выключателя, и это не может привести к неправильной координации схемы защиты. Если в систему встроено более одного объекта малой РГ, то сумма текущего вклада этих РГ в токи КЗ может оказать существенное влияние на защитные устройства и может привести к неправильной координации в схеме защиты и отсутствию координации между защитными устройствами.

Несмотря на различные преимущества, предлагаемые РГ, существует большая проблема защиты, связанная с ним. Результаты моделирования подтверждают, что уровни токов КЗ увеличиваются с подключением РГ в существующих системах. Это требует повышения мощности автоматического выключателя для безопасной и надежной работы системы. Существующие параметры сопротивления сети также будут влиять на увеличение уровня короткого замыкания. Таким образом, анализ токов КЗ в каждом случае отличается и уровни короткого замыкания должны быть проанализированы с помощью моделирования, прежде чем любой объект РГ будет подключен к сети.

Подключаемые в систему электроснабжения потребители или в прямой близости от них, энергоблоки МГ и РР оказывают непосредственное

воздействие на параметры и функционирование СЭС в аварийных режимах.

Производимый введением МГ эффект проявляется в следующем:

- повышение или снижение токов коротких замыканий ;

- преобразование направлений перетоков в режиме короткого замыкания при нерадиальном подключении МГ к распределительной сети;
- сбой или ложное срабатывания РЗ (уменьшение чувствительности релейной защиты в результате изменения амплитуд токов нормального и аварийного режимов);
- несоблюдение координации устройств РЗА;
- непродуктивность работы и выход из строя коммутационного электрооборудования.

При коротких замыканиях на шинах электроприемников (см. рисунок 9) в результате повышения сопротивления цепи при добавлении МГ, ток I_c , выражающий «сетевую» составляющую суммарного тока I_k , способен снизиться.

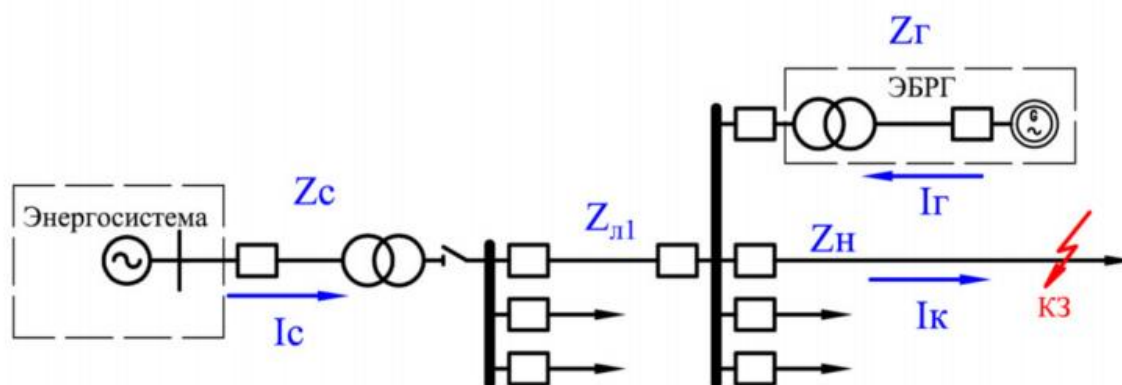


Рисунок 9 – Условная схема при КЗ на шинах нагрузки

Подобным образом, уменьшится чувствительность защит на высоких уровнях системы электроснабжения, появится возможность каскадного и неселективного срабатывания защиты. Вдобавок, за счет подпитки от МГ, «распределенная» составная часть I_g будет повышать суммарный I_k , равный сумме $(I_c + I_g)$. Следующий эффект отображается в неисполнении условий термической и электродинамической стойкости ЛЭП и электроустановок к токам короткого замыкания.

Особенной актуальностью рассматриваемый эффект обладает в существующих системах, в которые вводятся энергоблоки МГ и РР: результаты исследований показали, что в определенных условиях необходим пересчет и испытание коммутационной способности электрических приборов (в особенности в сетях низкого напряжения 0,4-0,66 кВ), термической и электродинамической кабельных линий, шинпроводов и электроустановок. Отрицательное влияние на устойчивость и бесперебойность работы, в том числе безопасность использования электрохозяйств способны привести к потребности проведения обширной реконструкции СЭС, ее адаптации к обстоятельства распределенной системы, в особенности для ответственных потребителей.

Воздействие блока МГ находится в зависимости от некоторых факторов, среди которых генерируемая мощность, отдаленность от точки КЗ и тип МГ.

На примере малой распределенной генерации, электроустановки с малой мощностью не оказывают значительного воздействия на токи КЗ; для сравнения, образование крупных энергоблоков из нескольких малых электроагрегатов, приводит еще более существенному увеличению токов короткого замыкания, увеличивая последствия их воздействия. В распределенных СЭС снижение мощностей установок МГ допустимо путем сокращения их выбора с назначением компенсации пиковых режимов, питания группы ответственных потребителей, но без обеспечения основной нагрузки потребителя.

Подбор месторасположения энергоблока МГ и точки подключения в локальной системе электроснабжения тоже выполняет роль в воздействии на характеристики аварийных режимов. При этом, две задачи (подбор рациональной точки снижение эффекта внедрения) находятся в зависимости от физических параметров и топологии СЭС. Таким образом, чем выше уровень подключения МГ, тем меньше воздействие. При оценке вариантов подключения энергоблоков МГ вероятны также следующие вариации:

подсоединения МГ к шинам локального распределительного пункта (РП) 0,4кВ - Г2; подсоединение МГ к шинам РП 6кВ - Г1, как это показано на рисунке 10.

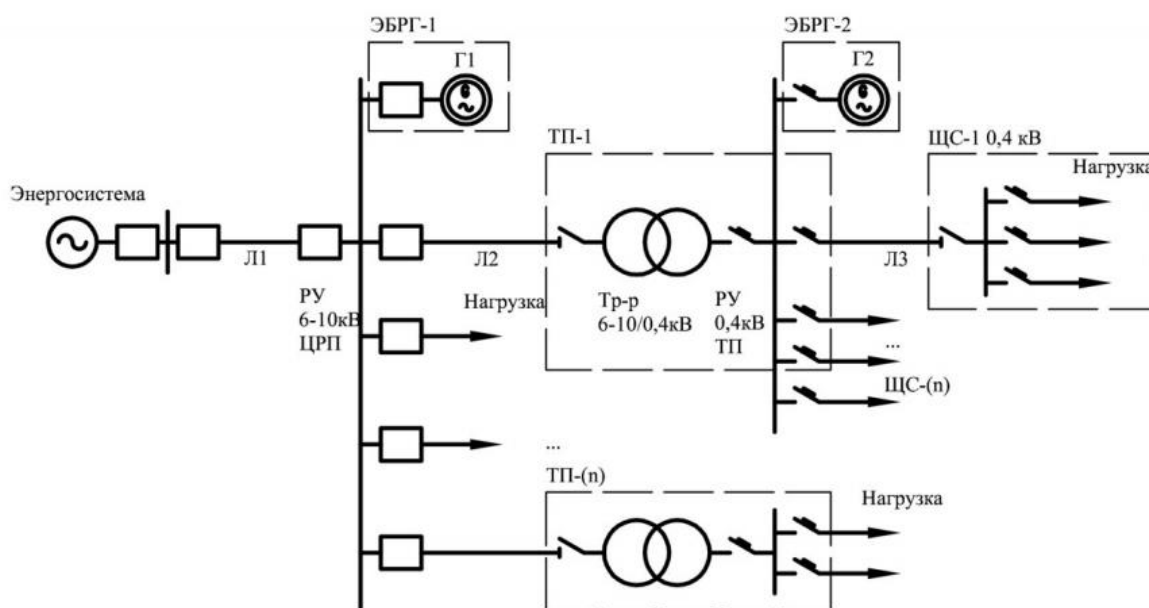


Рисунок 10 – Принципиальная схема подключения энергоблоков МГ к энергосистеме

Повышение сопротивления цепи КЗ при подключении к наиболее высокому уровню в данном случае компенсируется повышением мощности энергоблока МГ; противоположная ситуация - при снижении уровня точки подключения. Подобным образом для отдельной конкретной структуры СЭС возможность минимизирования эффекта внедрения с позиции повышения токов КЗ вводится моделированием или расчетным путем.

При непостоянном выделении в устройстве электропотребления отдельных узлов нагрузки с значительными потребителями электроэнергии, характеристики генератора Г₂, устанавливаемого напрямую в узле питания такого потребителя, способна сравниться с мощностью Г₁, подключаемого выше по уровню. Данная ситуация свойственна для предприятий, где, при наличии двух классов напряжения во внутренней распределительной сети,

например, за питание, технологической и административной части отвечают различные проведенного анализа. Предельное значение $I_{пог1}$ устанавливается при необходимой расчетной мощности генератора Г1.

Как показано на графике, при уменьшении отношения между электроустановками на разных уровнях, более значимой оказывается параметрическая структура СЭС, выделяющая версию подключения к более высокому уровню.

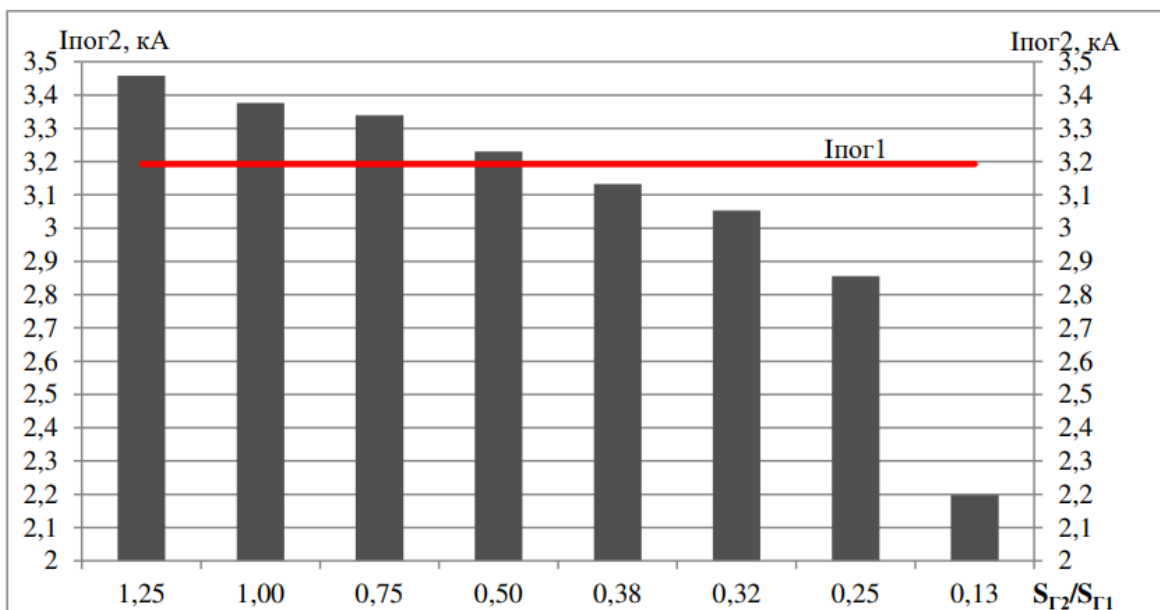


Рисунок 11 — Сопоставление значений токов подпитки при разных зависимостях мощностей $S_{Г2}/S_{Г1}$

Вид внедряемой электроустановки также имеет важность при анализе эффекта введения МГ. Значительное влияние проявляют блоки с синхронными генераторами, в особенности на протяжении первых некоторых периодов тока КЗ. Менее значимый вклад вносят инверторные энергоблоки, у части из которых длительность воздействия на КЗ не превосходит одного периода. Тем не менее, даже при небольшой длительности увеличения тока, результат внедрения может основательно отразиться на согласовании защит.

Преимущественно общим и легким решением по уменьшению воздействия повышения токов короткого замыкания является повышение полного сопротивления цепи КЗ благодаря включению реакторов или повышению сопротивления трансформаторов связи. При выполнении текущих мероприятий на стороне МГ удастся исключить значительных замен оборудования и изменений уставок защит, но недостатками данного метода являются понижение надежности распределенной системы, падение показателей качества по напряжению (из-за повышения колебаний и отклонений напряжения), также повышение потерь электроэнергии в цепи МГ.

Значительное влияние снижения эффекта внедрения МГ оказывает использование разделения сети. Это решение способствует значительному уменьшению уровней токов КЗ из-за повышения сопротивления цепи, вместе с тем оказывает воздействие на амплитуду колебания напряжения и бесперебойности системы электроснабжения.

3.4 Моделирование общей схемы распределенной системы генерации в PSCAD

Как правило, выпускаемое производителями генерирующее оборудование, предназначенное для малой распределенной генерации электроэнергии (дизель-генераторы, ветровые электростанции или ветровые электростанции) имеет возможность работы в двух различных режимах:

- в «островном» (автономном) режиме – без присоединения к сетям;
- параллельно с сетями.

Отличие состоит в способе управления генерацией электрической энергии для каждой единицы оборудования.

Островной режим – каждая электростанция при соответствующем уровне автоматизации обладает возможностью переключения из параллельного в островной режим работы (т.н. замещение сети) в случае

аварии на сетях, т.е. автономное питание нагрузки потребителей от генератора. Нагрузка может изменяться от 0 до 100%, при этом оборудование генерирует электрическую энергию, обеспечивая постоянный уровень напряжения независимо от нагрузки. В этом режиме выходное напряжение - главный параметр, который поддерживается автоматикой генерирующего оборудования. Если энергокомплекс состоит из параллельно включенных единиц оборудования, уровни напряжения и фазы между ними должны быть строго синхронизированы и автоматически регулироваться для обеспечения равномерной загрузки генерирующего оборудования.

Разрабатываемая модель МГ иллюстрирует распределительную систему генерации, которая может работать во время островного режима.

Распределенная генераторная система мощностью 20 кВ показана на Рисунке 12. Распределительная сеть подключается к Энергосистеме напряжением 220 кВ через повышающий трансформатор мощностью 100 МВА и напряжением 220/20 кВ. Блоки распределенной генерации соединены воздушными линиями Т22 – 5км, Т22-1– 5 км, Т22-2 –15км, Т22-3 –20 км, Т22-4– 5 км, Т31 – 5км. Данные блоки могут функционировать как вместе, так и по отдельности.

В модель, показанную на рисунке 12, включены следующие типы объектов, относящихся к объектам распределенной генерации, как было рассмотрено в главе 1 ВКР:

- Ветряная электростанция;
- Фотоэлектрическая электростанция без накопителя мощности;
- Фотоэлектрическая электростанция с накопителем мощности;
- Дизель-генераторная электростанция.

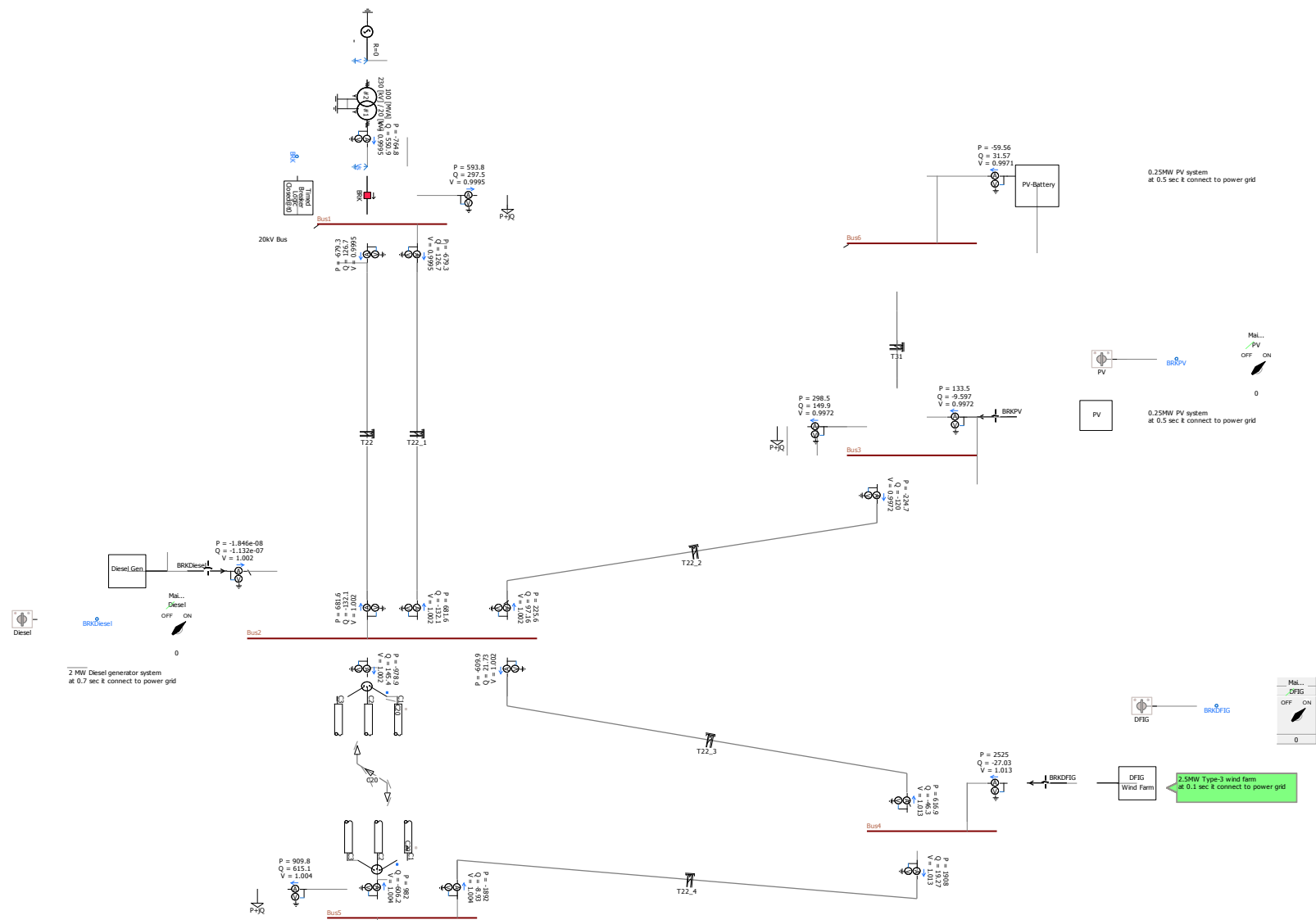


Рисунок 12 – Общая схема распределенной системы генерации

Дизель-генераторная система мощностью 2 МВт через 0,7 с от начала моделирования режима работы системы подключается в распределительную сеть. Ветряная электростанция типа-3 мощностью 2,5 МВт через 0,1 с начала моделирования режима работы системы подключается в распределительную сеть. Система фотоэлектрической батареи и фотоэлектрической системы по 0.25 МВт каждая через 0.5 с начала моделирования режима работы системы подключается в распределительную сеть. Распределенное по времени подключение объектов в распределительную сеть, позволяет упростить режим синхронизации. И повысить общую скорость счета модели участка энергосистема с объектами распределенной генерации. Изначально задано, что модель участка энергосистемы с объектами распределенной генерации функционирует в островном режиме, т.е. выключатель связи с энергосистемой разомкнут. Рассмотрим подробнее схемы моделей объектов, входящих в модель энергосистемы с объектами распределенной генерации.

3.4.1 Фотоэлектрическая система

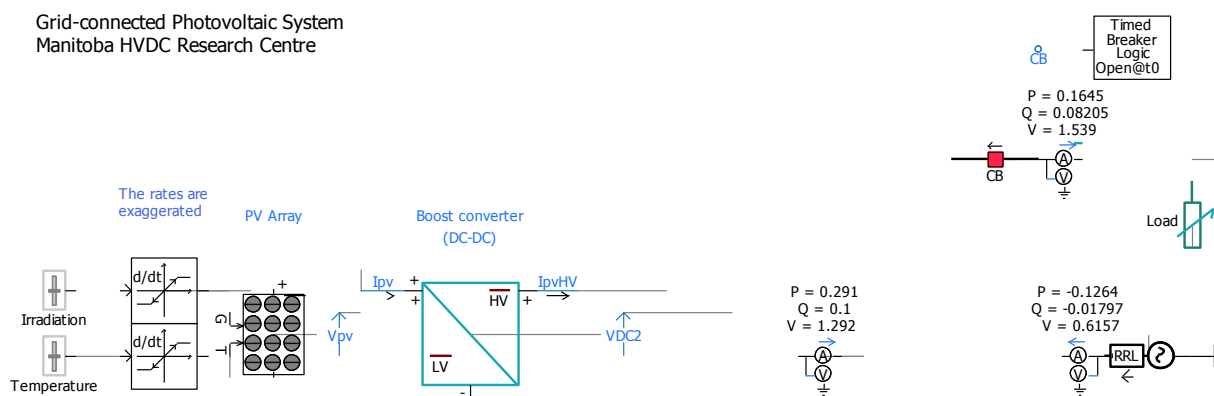


Рисунок 13 – Общая фотоэлектрическая система, подключенная к сети

Фотоэлектрическая матрица подключается к преобразователю постоянного тока (повышающий преобразователь). Выходная мощность фотоэлектрической матрицы является функцией входных сигналов, а именно облучения и температуры.

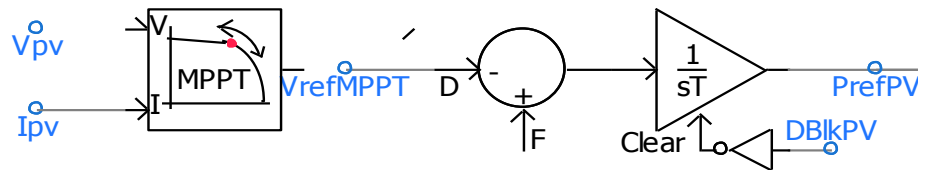


Рисунок 14 – Контроллер поиска точки оптимальной мощности
исходная система контроля мощности

На основе исходной мощности, генерируемой контроллером поиска точки оптимальной мощности (MPPT), повышающий преобразователь регулирует постоянный ток канала I_{pvHV} (рисунок 14). Преобразователь источника напряжения (VSC) управляет постоянным напряжением V_{DC2} и пытается поддерживать его исходное значение.

Например, если мощность фотоэлектрической системы увеличивается из-за повышения облучения на фотоэлектрической матрице, повышающий преобразователь увеличивает свой рабочий цикл, так что из фотоэлектрической матрицы поступает больше тока. В результате напряжение звена постоянного тока V_{DC2} увеличивается. Для поддержания уровня напряжения постоянного тока на звене постоянного тока VSC потребляется больше тока от звена постоянного тока. Таким образом, происходит регулирование напряжения звена постоянного тока и соблюдение задания мощности от MPPT.

На рисунке 15 показана схема подключения фотоэлектрической матрицы к сопротивлению.

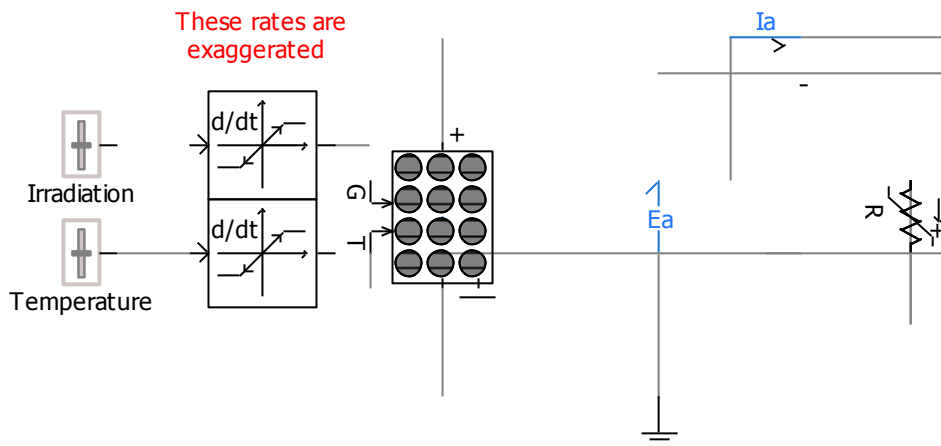


Рисунок 15 – Настройка цепи для понимания характеристик фотоэлектрической матрицы

Повышающий преобразователь, показанный на рисунке 16, состоит из фильтра нижних частот на входной стороне. Контроллер показан на рисунке 17, где исходная мощность (P_{ref}) сравнивается с мощностью канала постоянного тока (P_{dc}), а сигнал ошибки подается на контроллер PI для формирования рабочего цикла повышающего преобразователя (Ref_Boost). Коэффициенты регулятора PI (т. е. K_pBoost и T_iBoost) и его выходной предел ($D_{maxBoost}$) можно регулировать с помощью панели управления, показанной на рисунке 17.

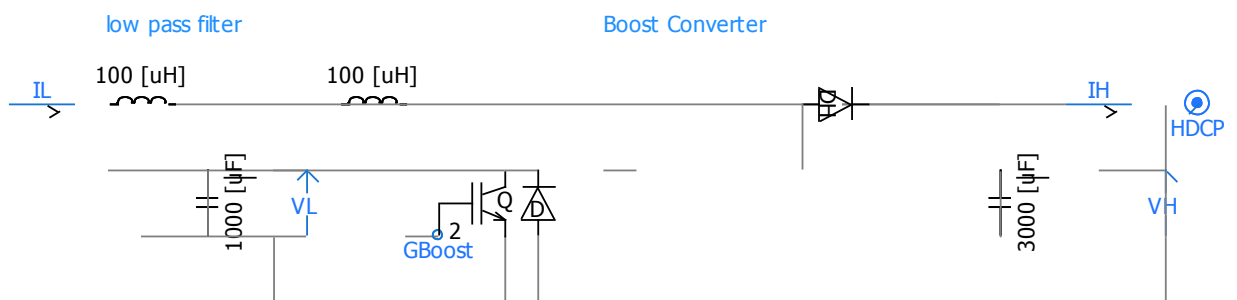


Рисунок 16 – Повышающий преобразователь

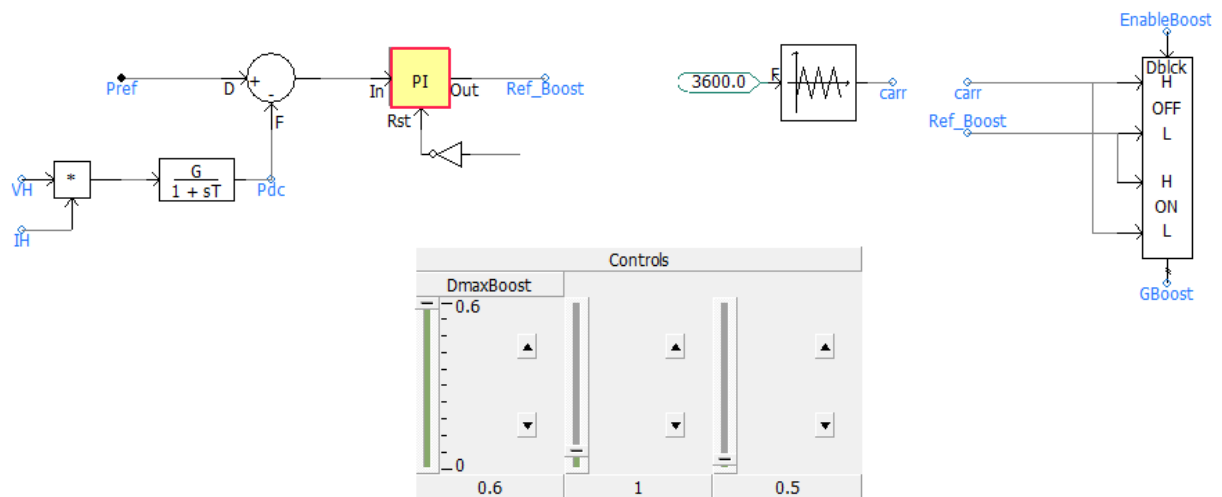


Рисунок 17 – Силовой контроллер

Для защиты повышающего преобразователя от больших токов исходная мощность ограничена максимальной мощностью (P_{lim}).

Чтобы изменить параметры VSC, нужно щелкнуть правой кнопкой мыши на компоненте VSC и выберите пункт “Изменить параметры”, (рисунок 17). Реактивная реактивная мощность указана в МВар (отрицательное значение указывает, что VSC генерирует реактивную мощность, а положительное значение указывает, что VSC потребляет реактивную мощность).

На рисунке 18 показаны коэффициенты для элементов управления PI и панели для изменения значений в случае необходимости.

VSC/ VSI (voltage source converter / inverter) – преобразователь / инвертор с питанием от источника напряжения. Система отвечает «привычным представлениям»: напряжение входной сети постоянно, а величина тока в цепи зависит от мощности нагрузки.

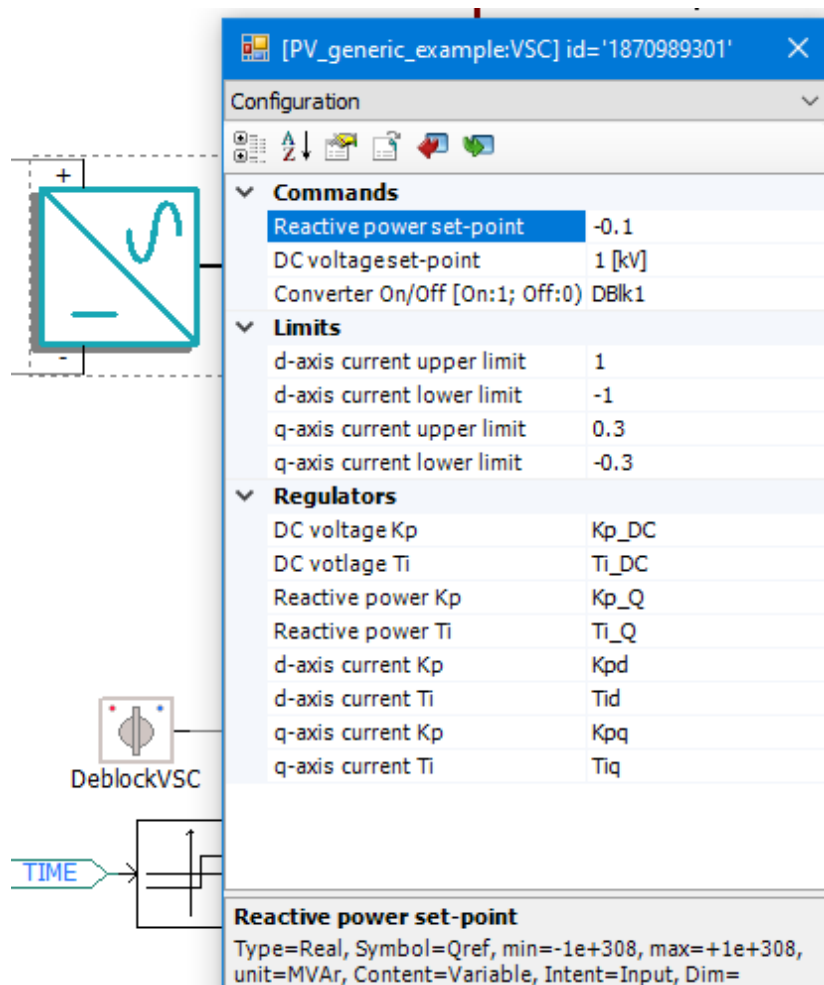


Рисунок 17 – Модуль преобразователя источника напряжения и входные параметры

Технология передачи постоянного тока высокого напряжения, использующая преобразователи VSC (с питанием от источника напряжения), является относительно новой, поскольку она использует биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ). Поэтому, благодаря развитию полупроводниковой технологии, он может достичь высоких напряжений преобразуемой энергии. Поскольку частота переключений увеличивает количество гармоник, при этом также снижается количество фильтров. Но это увеличивает потери энергии и неэффективность системы.

Regulator parameters
(VSC converter)

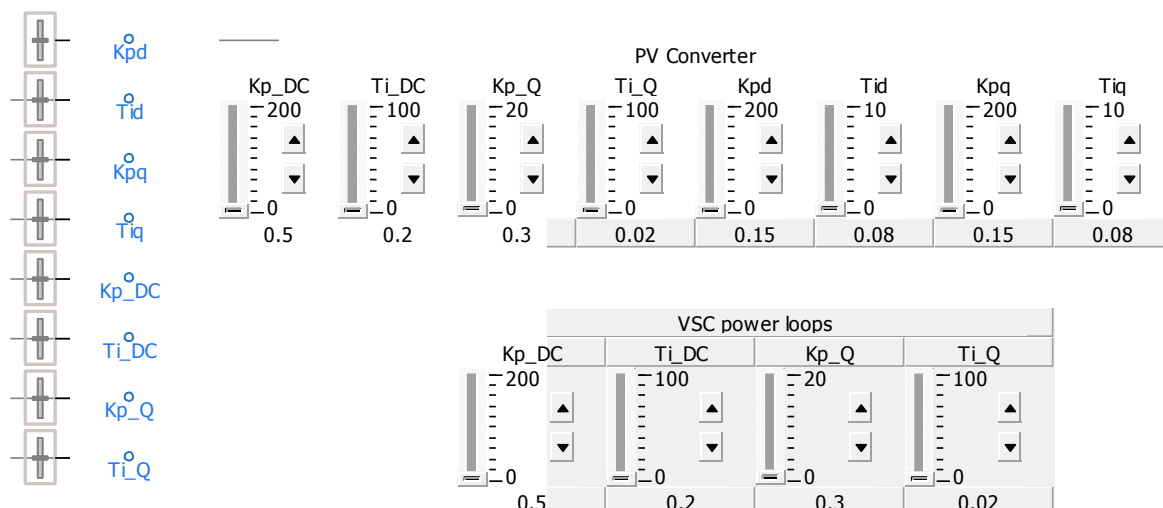


Рисунок 18 – Коэффициенты K_p и T_i контроллеров PI для VSC

Система переменного тока соединена с преобразователем посредством трансформатора, позволяющего увеличить напряжение до того уровня, который требуется на входе преобразователя VSC. Этот трансформатор также обеспечивает реактивное сопротивление между системой переменного тока и системой VSC, предотвращая движение тока нулевой частоты между системой переменного тока и преобразователем.

Конденсаторы связи постоянного тока составляют 3,9 мФ.

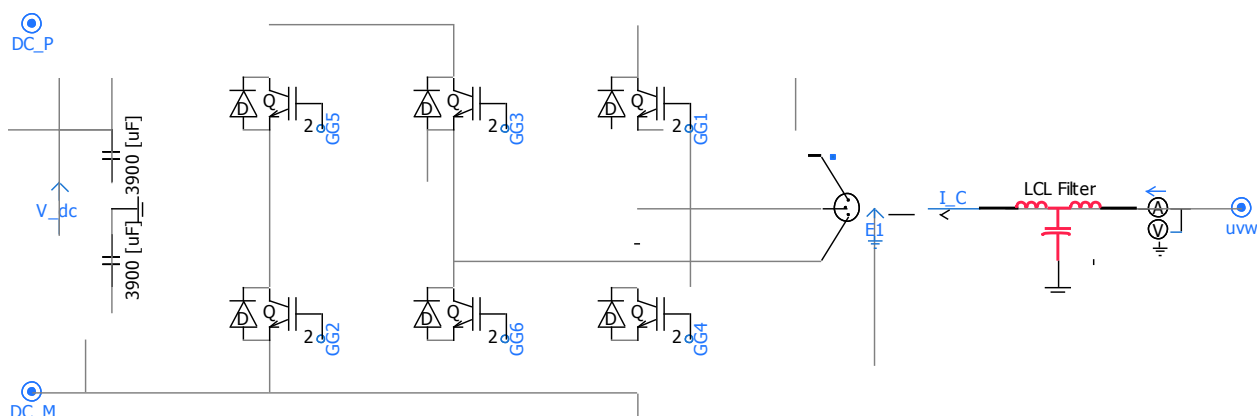


Рисунок 19 – Преобразователь источника напряжения, конденсаторы звена постоянного тока и боковой фильтр переменного тока

Контроллер постоянного напряжения – это электронное устройство, отвечающее за преобразование переменного напряжения, вырабатываемого

генератором в постоянное, и контроль заряда аккумуляторных батарей. Наличие контроллера в схеме работы фотоэлектрической системы позволяет осуществлять работу в автоматическом режиме вне зависимости от внешних факторов (рисунок 20).

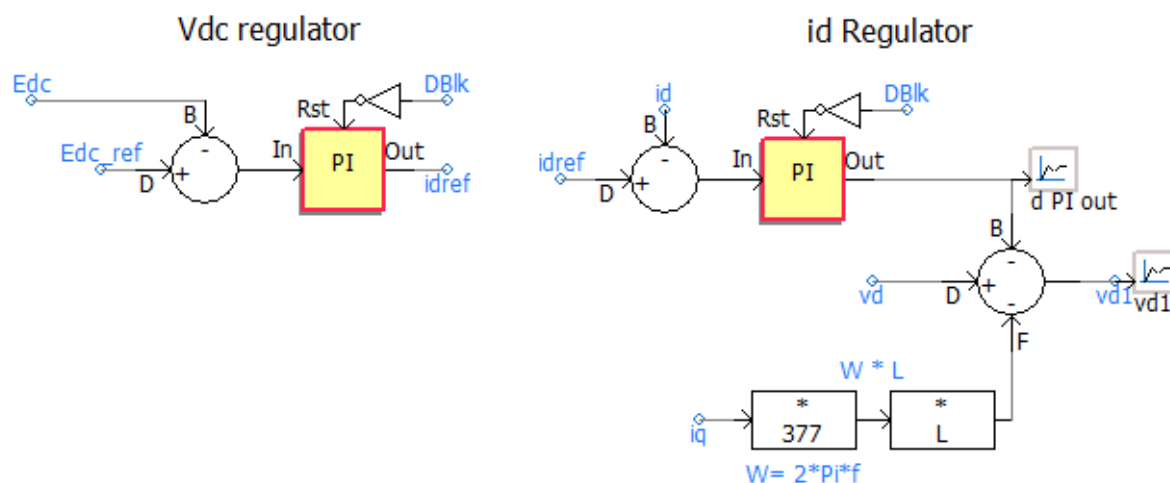


Рисунок 20 – Контроллер постоянного напряжения

Регулятор реактивной мощности — это устройство, обеспечивающее автоматическое, оптимальное управление установкой компенсации реактивной мощности.

Регуляторы реактивной мощности применяемые в установках компенсации реактивной мощности оснащены измерительными контурами тока и напряжения, после цифровой обработки измеренных величин с достаточно высокой точностью определяются значения коэффициента мощности $\cos \varphi$ и путем подключения или отключения необходимого числа батарей конденсаторов осуществляется регулирование реактивной мощности

Обеспечение соблюдения требуемого коэффициента мощности с большой точностью и в широком диапазоне компенсируемой реактивной мощности в установках обеспечивается микропроцессорным программируемым контроллером – регулятором реактивной мощности.

Регулятор реактивной мощности автоматически отслеживает изменение реактивной мощности нагрузки и, в соответствии с заданным

значение коэффициента мощности корректирует $\cos\phi$ управляя коммутационными аппаратами секций конденсаторных батарей.

Регулятор реактивной мощности показан на рисунке 21.

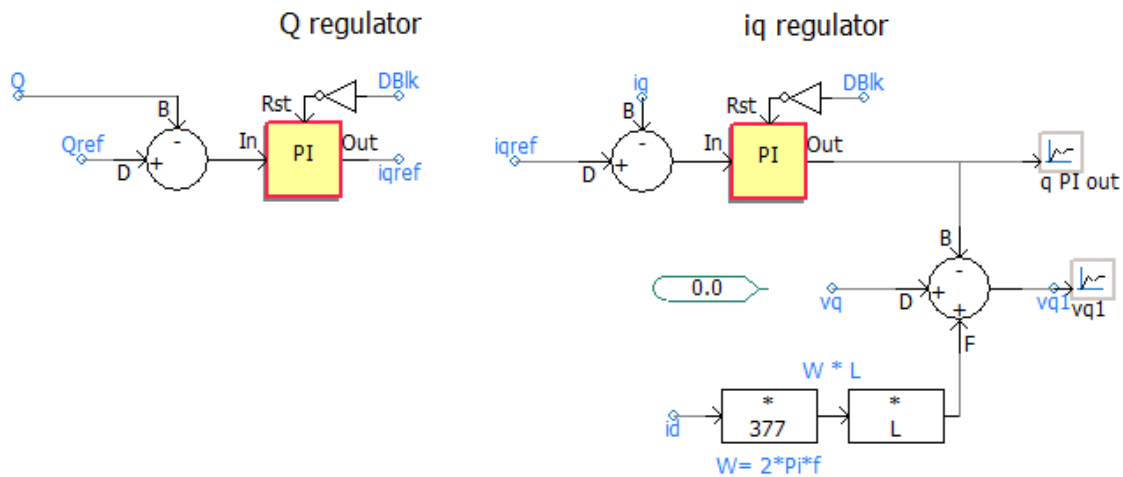


Рисунок 21 – Регулятор реактивной мощности

3.4.1.1 Система фотоэлектрической батареи

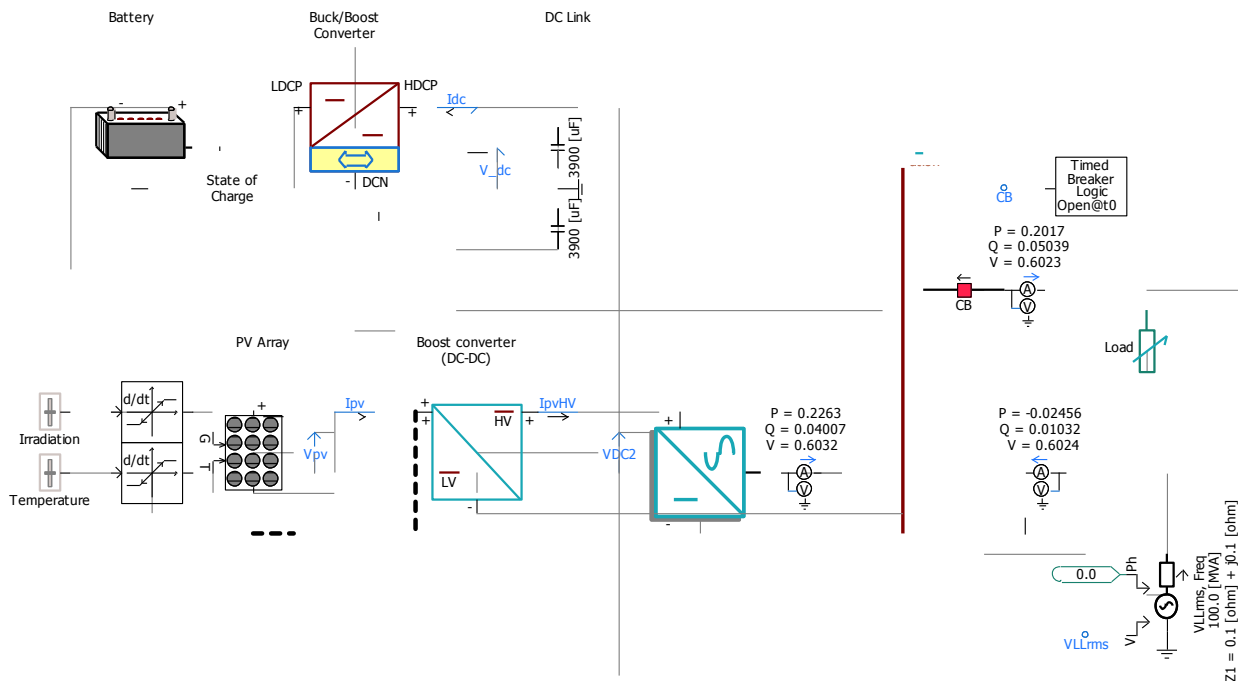


Рисунок 22– Общая система фотоэлектрических батарей, подключенная к источнику эквивалентного напряжения (автономный режим не активируется)

Фотоэлектрическая матрица подключается к DC-DC преобразователю (повышающему преобразователю). Выходная мощность фотоэлектрической матрицы зависит от входных параметров, а именно от облучения и температуры (рисунок 23).

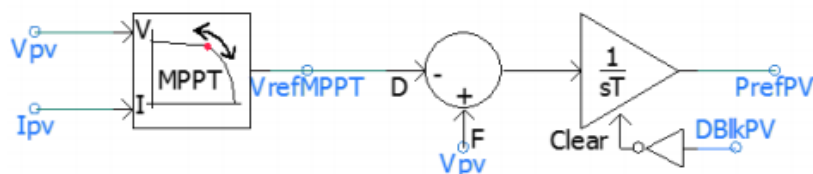


Рисунок 23 – Трекер максимальной мощности и исходная система управления мощностью

На основе исходной мощности, генерируемой контроллером поиска точки оптимальной мощности (MPPT), повышающий преобразователь регулирует ток звена постоянного тока I_{pvHV} (Рисунок 22). Преобразователь источника напряжения (VSC) управляет постоянным напряжением V_{DC2} и пытается поддерживать его исходное значение.

Например, если мощность фотоэлектрической системы увеличивается из-за увеличения интенсивности облучения в фотоэлектрической матрице, повышающий преобразователь увеличивает свой рабочий цикл, в итоге из фотоэлектрической матрицы вырабатывается больше тока. В результате напряжение постоянного тока звена V_{DC2} увеличивается. Для поддержания уровня напряжения постоянного тока на звене VSC потребляется больше тока от звена постоянного тока. Таким образом, регулируется напряжение звена постоянного тока и соблюдается опорная мощность от MPPT.

На рисунке 24 показана выходная мощность фотоэлектрической матрицы в зависимости от облучения ($Вт/м^2$) при температуре $30^{\circ}C$ и увеличении облучения от 700 Вт/м^2 до 1500 Вт/м^2 . На рисунке 25 показаны изменения мощности при постоянном облучении, равном 1500 Вт/м^2 , а температура увеличивается с $10^{\circ}C$ до $50^{\circ}C$.

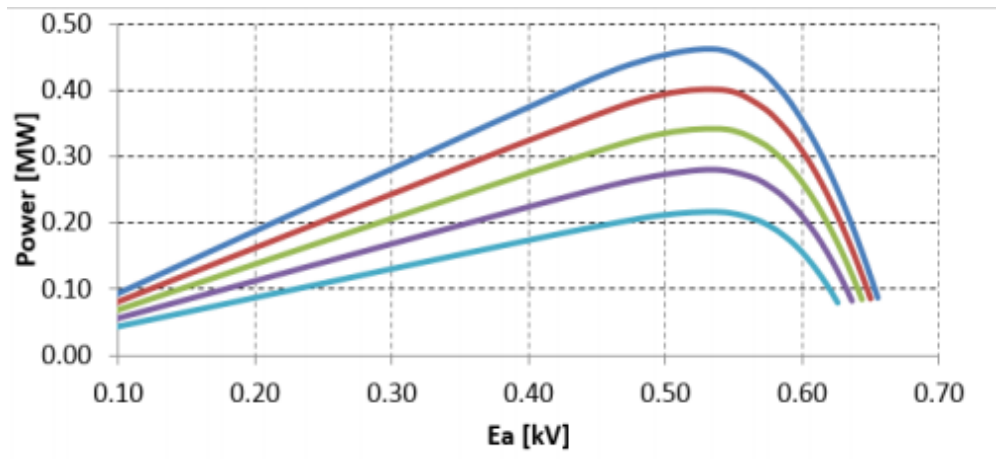


Рисунок 24 – Изменение мощности в зависимости от облучения (колеблется от 700 Вт/м² до 1500 Вт/м²) в зависимости от Ea

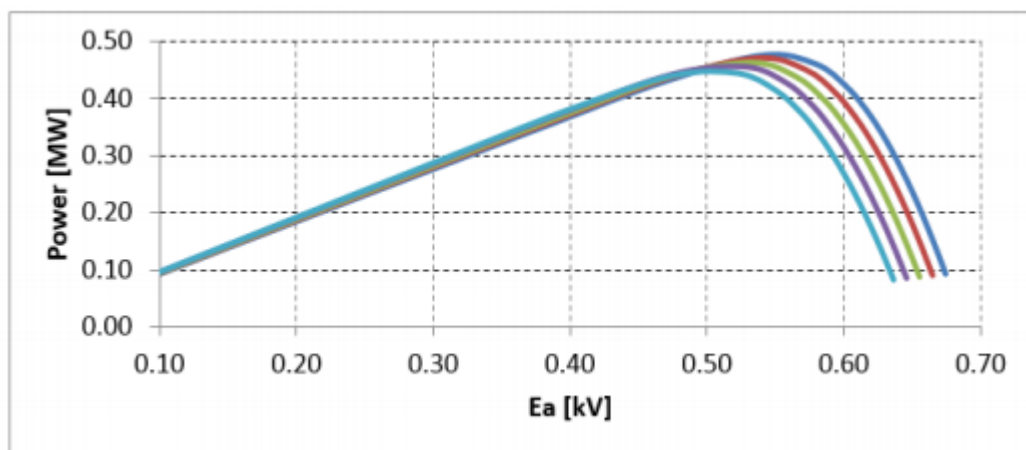


Рисунок 25 – Изменение мощности в зависимости от температуры (колеблется от 10°C до 50°C) в зависимости от Ea

В однофазной аккумуляторной системе аккумулятор подключен к преобразователю постоянного тока (понижающему/повышающему преобразователю). Преобразователь DC-DC работает как понижающий или повышающий преобразователь для зарядки или разрядки аккумулятора. Преобразователь DC-DC подключается к преобразователю DC-AC через систему DC Link с конденсаторами 3900 мкФ. Преобразователь постоянного тока в переменный управляет постоянным напряжением (V_{dc}) на линии постоянного тока. Номинальное напряжение постоянного тока для батареи

составляет 200 В. Данная модель основана на нескольких упрощающих условиях и имеет некоторые ограничения.

Условия:

- Во время циклов заряда и разряда внутреннее сопротивление считается постоянным.
- Амплитуда тока не оказывает никакого влияния на внутреннее сопротивление.
- Кривая характеристик разряда батареи используется для получения параметров батареи, поскольку предполагается, что характеристики разряда и заряда одинаковы.
- Амплитуда тока не оказывает никакого влияния на емкость аккумулятора (отсутствует эффект Пьюкерта).
- Температура не меняет поведение модели.
- Зарядка и разрядка не влияют на характеристики батареи (т.е. нет гистерезиса).

Ограничения:

- Напряжение аккумулятора не может быть отрицательным, и максимальное напряжение аккумулятора не ограничено.
- Емкость аккумулятора не может быть отрицательной, и максимальная емкость не ограничена

Понижающий/Повышающий Преобразователь показан на рисунке 26. Он подключен к батарее (низкого напряжения: 200 В) с правой стороны и подключается к системе постоянного тока с левой стороны (высокое напряжение: 250 В).

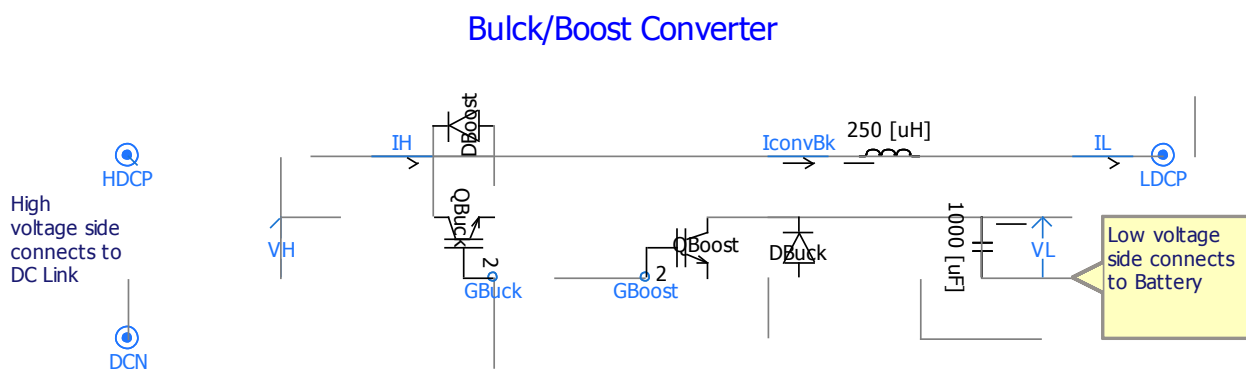


Рисунок 26 – Понижающий/Повышающий Преобразователь

3.4.1.2 Система контроля и оценки верхнего уровня

Система управления верхнего уровня показана на рисунке 27. Эта система управления является ручной и также доступна в модуле «Graphs_and_Controls». Панель управления "Charger On/Off" предназначена для включения/выключения преобразователя понижающий/повышающий вручную. Этот контроллер также может быть предоставлен автоматически на основе системы защиты от перенапряжения или перегрузки по току. Другой контроллер — это «Режим», который управляет режимом работы преобразователя. Другими словами, используя этот элемент управления, аккумулятор можно заряжать или разряжать. Этот контроллер также является ручным. Однако он может быть запрограммирован автоматически на основе системы управления питанием.

SOCpermit — это сигнал, который не позволяет заряжать или разряжать, когда SOC выше 100% или меньше, чем 5% соответственно.

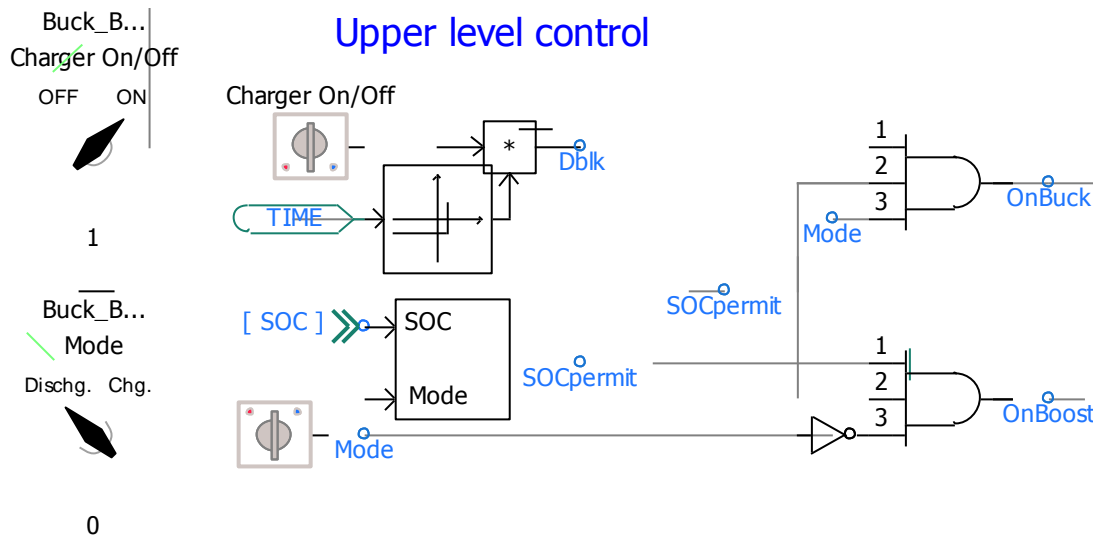


Рисунок 27 – Контроллеры верхнего уровня

Исходное напряжение можно выбрать для преобразователя с помощью ползунка, показанного на рисунке 28. Это значение выбирается на основе номинальных характеристик батареи, которая составляет 200В.

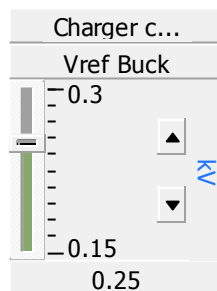


Рисунок 28 – ползунок переменного входного сигнала, показывающий опорное напряжение

3.4.2 Ветряная электростанция

Детальная модель состоит из переключателей биполярного транзистора с изолированным затвором (IGBT), поэтому гармоники и переходные процессы, связанные с коммутацией, могут быть точно смоделированы. Однако для правильного моделирования переключения IGBT необходим небольшой шаг времени решения, что увеличивает время моделирования.

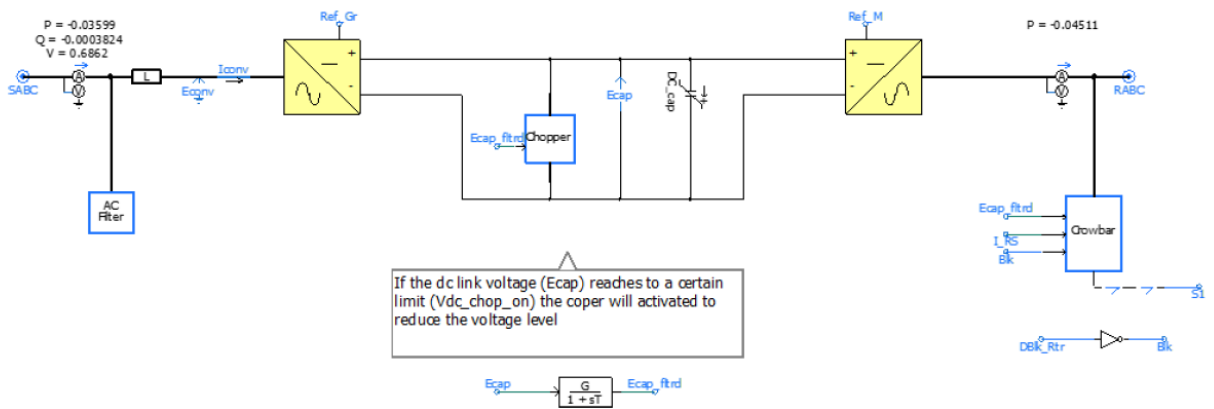


Рисунок 29 – Ветроурубина типа 3 с детальной моделью преобразователя

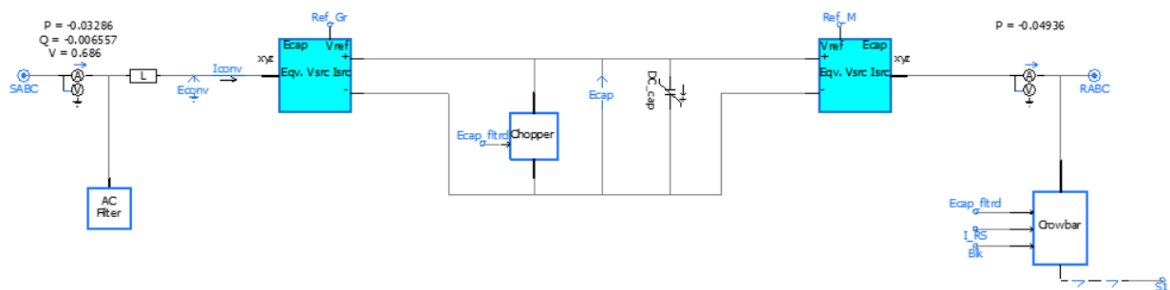


Рисунок 30 – Ветроурубина типа 3 со средней моделью преобразователя

Средняя модель преобразователя состоит из эквивалентных источников тока и напряжения. Эта модель не требует переключения, поэтому временной шаг решения может быть значительно увеличен по сравнению с детальным. Это экономит значительное время моделирования; однако переходное поведение преобразователя и гармоник может быть не полностью представлено во время моделирования. Эта модель может быть использована для конкретных исследований энергосистемы, где интересны медленные переходные процессы, и для большинства случаев отказа от неисправностей.

3.4.2.1 Электрические и механические компоненты ветроурубины типа 3

В этом разделе представлен ветрогенератор типа 3 (WTG), также известный как двухпоточный асинхронный генератор (DFIG). Она описана в

виде двух отдельных систем-механической и электрической - как показано на рисунке 31. Механическая система извлекает максимальную доступную мощность из ветра и дает механический крутящий момент. Электрическая система преобразует механический крутящий момент в электрический и, следовательно, в электрическую мощность. Интерфейс между механической и электрической системами представляет собой индукционную машину (ИМ), которая преобразует механическую энергию в электрическую. Механические и электрические системы, показанные на Рисунке 31, представлены следующими компонентами.

Механическая система состоит из:

- Ветродвижитель;
- Регулятор угла наклона.

Электрическая система состоит из

- Сетевого преобразователя и элементов управления;
- Роторного преобразователя и элементов управления;
- Защита инвертора постоянного тока;
- Crowbar protection (безотказный защитный механизм, который замыкает цепь на выходе источника питания в условиях отказа, таких как перенапряжение);
- Фильтр нижних частот.

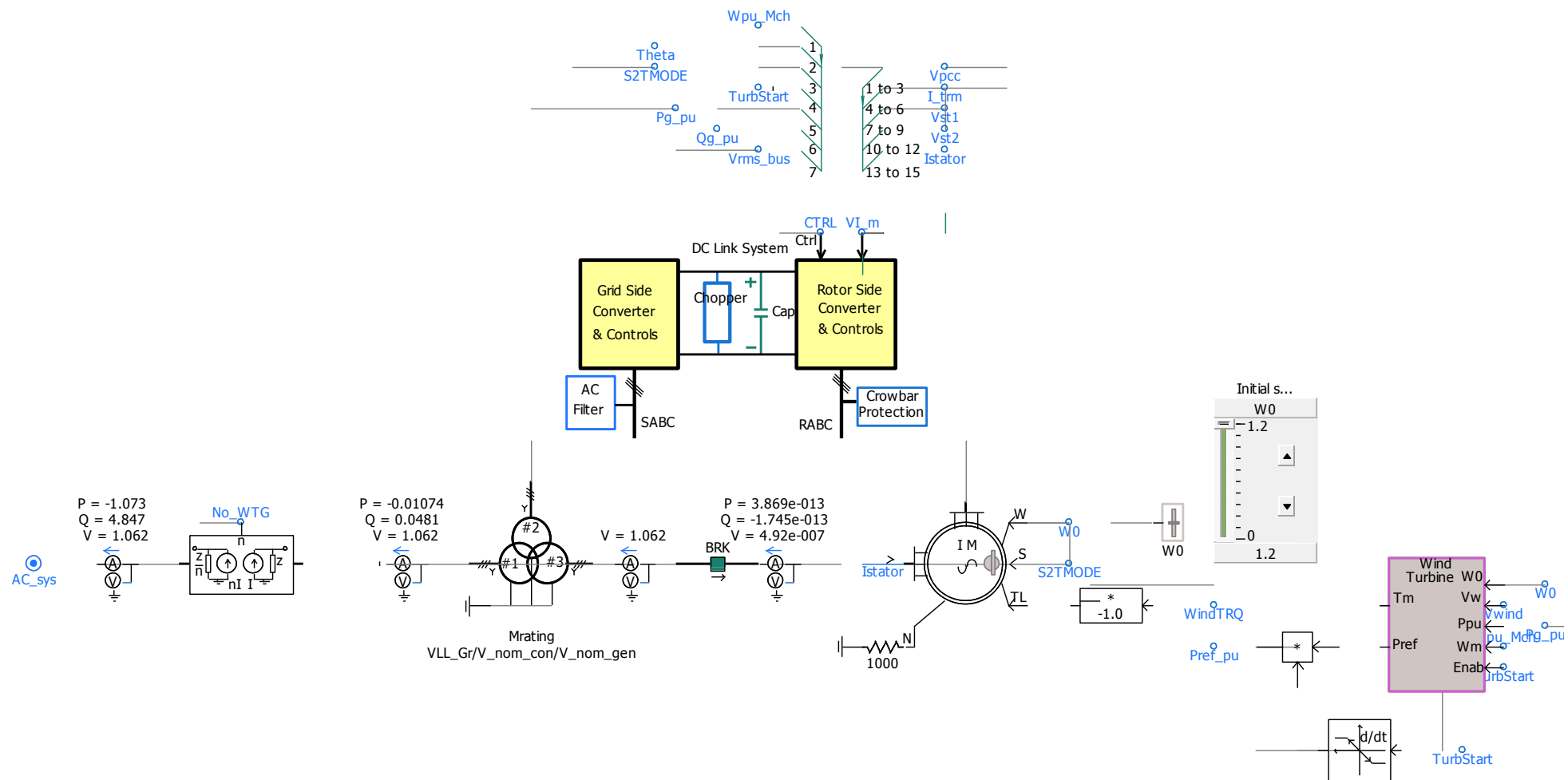


Рисунок 31 – Электромеханическая система ветрогенератора как для средней, так и для детальной моделей.

3.4.2.2 Ветроустановка и энергетическая сеть

На рисунке 31 показан компонент ветряной турбины типа 3 (WT) и его исходные параметры. Эти параметры одинаковы как для среднего, так и для детального режима. Параметры можно увидеть, щелкнув правой кнопкой мыши на компоненте и выбрав Edith Parameters.

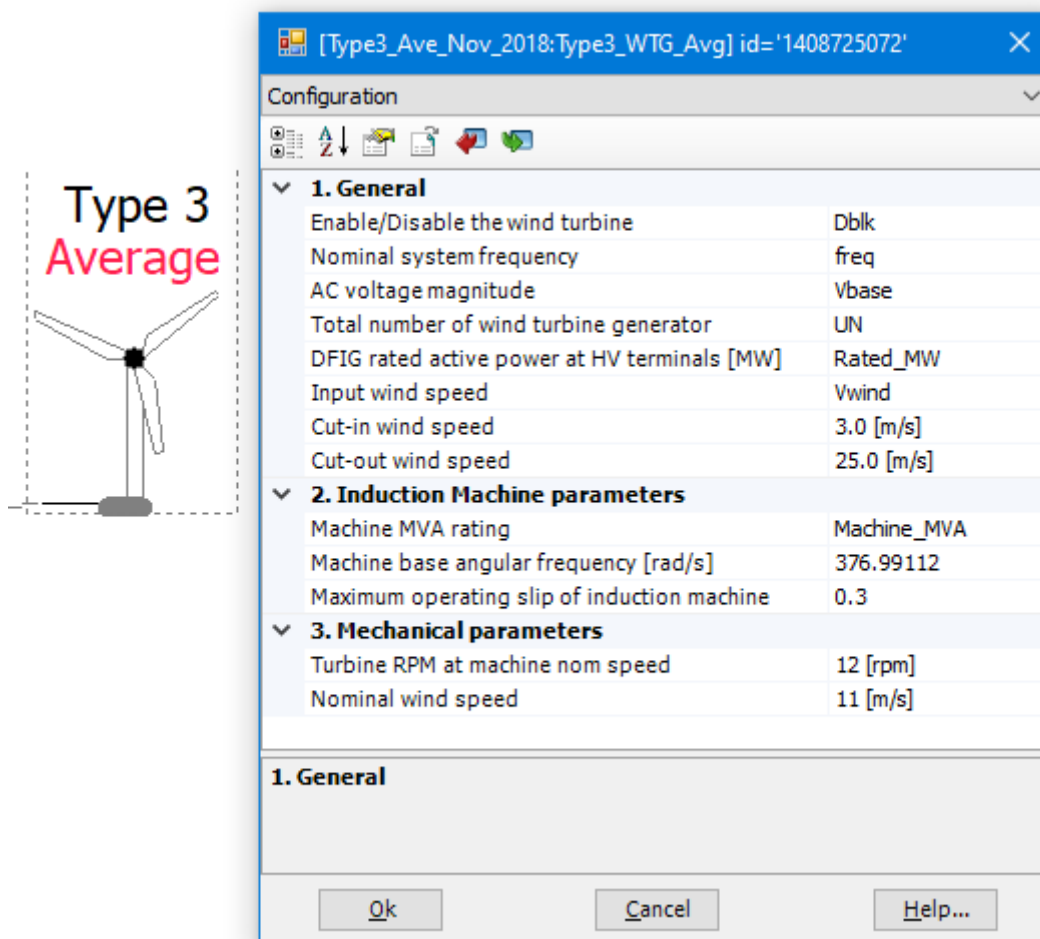


Рисунок 32 – Ветроустановка типа 3 как для средней, так и для детальной моделей компонент ветроустановки и исходные параметры

На рисунке 33 показана общая энергетическая система, в которой ветроустановка типа 3 (детальная или средняя) подключается к электрической сети через кабель, трансформатор и линию электропередачи. Коэффициент короткого замыкания на клемме ветроустановки составляет 1,8.

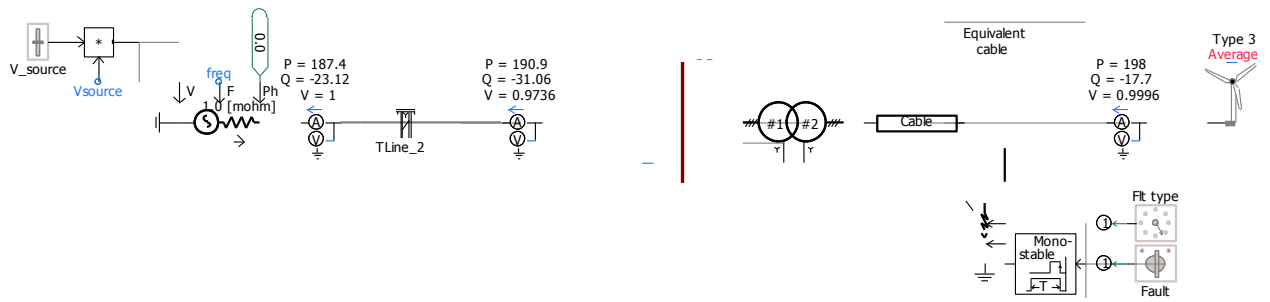


Рисунок 33 – Общая энергетическая система с ветротурбиной типа 3 (Вт) и эквивалентным источником тока

3.4.2.3 Турбина

Компонент ветротурбины показанный на рисунке 34 моделирует механическую динамику и регулятор шага. Основная функция ветротурбины заключается в извлечении максимальной мощности из имеющегося ветра без превышения номинальной мощности оборудования. Существуют некоторые ограничения при работе на нулевой мощности - когда скорость ветра ниже 4 м/с, а также при сильном ветре со скоростью ветра более 25 м/с. Номинальная скорость ветра 11 м / с.

Configuration	
1. Machine parameters	
Reference machine speed set point	1.2
Base Active power	Pbase
2. Turbine parameters	
Turbine radius	46 [m]
Turbine RPM at machine nom speed	VRot_nom
Air density kg/m3	1.225
Cut-in wind speed	vWcutin
Cut-out wind speed	vWcutout
1. Machine parameters	

Рисунок 34 – Модель ветровой турбины: компонент и его параметры

3.4.2.4 Регулятор угла наклона

Когда скорость ветра превышает номинальную скорость, доступная механическая мощность превышает номинальную мощность асинхронной машины. Мощность, подаваемая в электрическую систему, ограничена за счет уменьшения эффективной площади лезвия. Это достигается за счет увеличения угла тангажа. Типичный диапазон для угла составляет от 0° до 25° .



Рисунок 35 – Упрощенный регулятор угла наклона

3.4.2.5 Электрическая модель

Электрическая часть ветротурбины состоит из указательного устройства и преобразователя переменного тока в постоянный. На рисунке 36 показан асинхронный электродвигатель и его характеристики. асинхронный электродвигатель запускается в режиме регулирования скорости, когда входной сигнал " S " установлен на 1. Значение на входе ' W ' со скоростью вращения машины устанавливается в заранее выбранное значение ω_0 . В идеале эта скорость должна быть настроена близко к конечной установившейся скорости вращения, которая составляет 1,2 pu. Когда асинхронный двигатель синхронизирован с сетью, S поворачивается к нулю и работает в режиме регулирования крутящего момента.

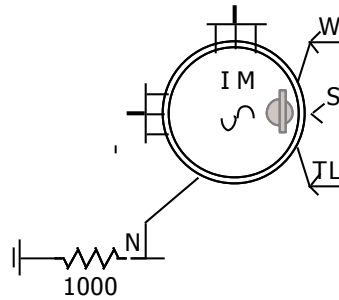


Рисунок 36 - Компонент машины с намотанным ротором PSCAD

- W: когда машина находится в режиме контроля скорости, она работает со скоростью W_0 ;
- S: переключатель для выбора режима регулирования скорости (1) или режима регулирования крутящего момента (0);
- T: если машина находится в режиме управления крутящим моментом, то машина вычисляет скорость на основе коэффициента инерции и демпфирования, входного и выходного крутящих моментов.

Преобразователи переменного тока в постоянный (AC-DC-AC)

Преобразователь AC-DC-AC состоит из:

- роторного преобразователя,
- сетевого преобразователя,
- системы постоянного тока,
- роторного контроллера,
- сетевого контроллера.

Также на рисунке 37 показаны другие важные части системы:

- защиты от перенапряжения,
- инвертора постоянного тока,
- фильтра низких частот.

Сетевой преобразователь управляет постоянным напряжением и, в то время как роторный преобразователь управляет активной мощностью и переменным напряжением, управляя токами цепи ротора. В этом примере

оба преобразователя со стороны ротора и от сети работают как преобразователи источника напряжения (VSC).

Преобразователь со стороны ротора и преобразователь со стороны сети моделируются как детальная и средняя модель. Защита от перенапряжения используется для защиты преобразователя на стороне ротора от высокого тока, наведенного от статора в ротор во время событий отказа. Инвертор постоянного тока используется для защиты шины постоянного тока от перенапряжений. Фильтр переменного тока используется на стороне сетевого преобразователя для удаления некоторых гармоник напряжения двухуровневого преобразователя.

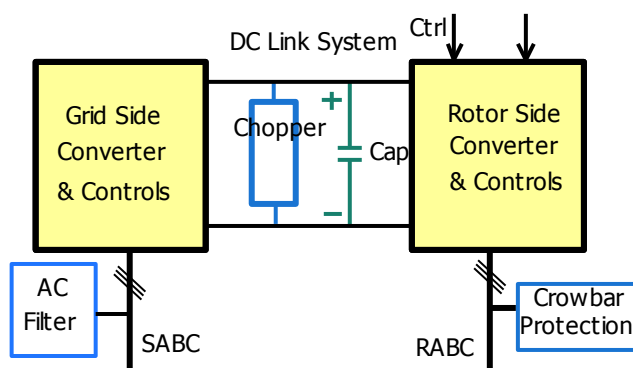


Рисунок 37 – Преобразователь AC-DC-AC состоит из преобразователя на стороне сети, на стороне ротора, цепи постоянного тока, защиты от перенапряжения и фильтра нижних частот

Схема защиты от перенапряжений методом шунтирования источника питания

Согласно большинству новых требований к сетевому коду, ветряные турбины должны оставаться подключенными к сети во время сбоев в работе сети и обеспечивать поддержку напряжения вовремя и после сбоев. Система защиты от перенапряжений необходима для того, чтобы избежать отключения ветротурбины от сети во время неисправности. Кроме того, данная установка в цепи ротора позволяет более эффективно регулировать напряжение в неисправных режимах. Поскольку ветрогенератор на основе

DFIG имеет статор, подключенный к сети, делается обмотка ротора чувствительной к высоким токам, возникающим при неисправностях. Также обмотки ротора подключаются к сетке через преобразователь AC-DC-AC, который очень чувствителен к перегрузкам по току.

Продолжительность активации защиты от перенапряжений зависит от требований к сети. Для сетей с малым проникновением ветра введение реактивного тока при повреждениях обычно не требуется. В этом случае защита от перенапряжений обычно активируется на весь срок действия неисправности. Однако во время защиты ветряная турбина не может вводить реактивную мощность. Поэтому защита активируется в течение фиксированного периода времени, например от 50 до 100 мс. Система защиты от перенапряжений — это сопротивление, управляемое силовой электроникой. В предоставленных файлах DFIG были предоставлены две разные опции для активации системы: напряжение постоянного тока, превышающее предварительно определенное напряжение постоянного тока, или токи ротора, превышающие предварительно определенное значение. Логика управления системой показана на рисунке 38.

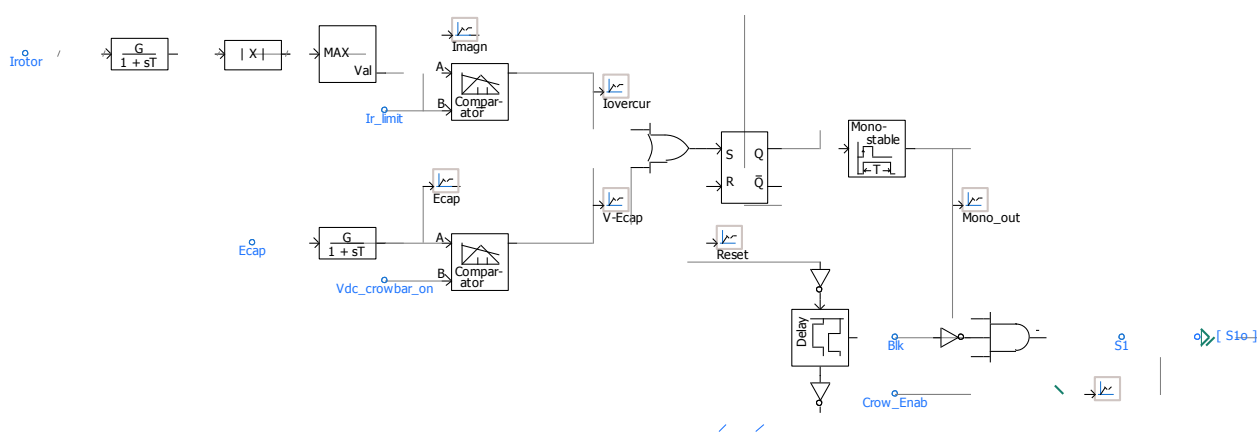


Рисунок 38 – Схема защиты от перенапряжений методом шунтирования источника питания

3.4.3 Фильтр низких частот

Силовые электронные преобразователи генерируют значительное количество гармоник. Фильтр используется на стороне сети, чтобы свести к минимуму влияние гармоник на сеть. Структура фильтра представлена на рисунке 41.

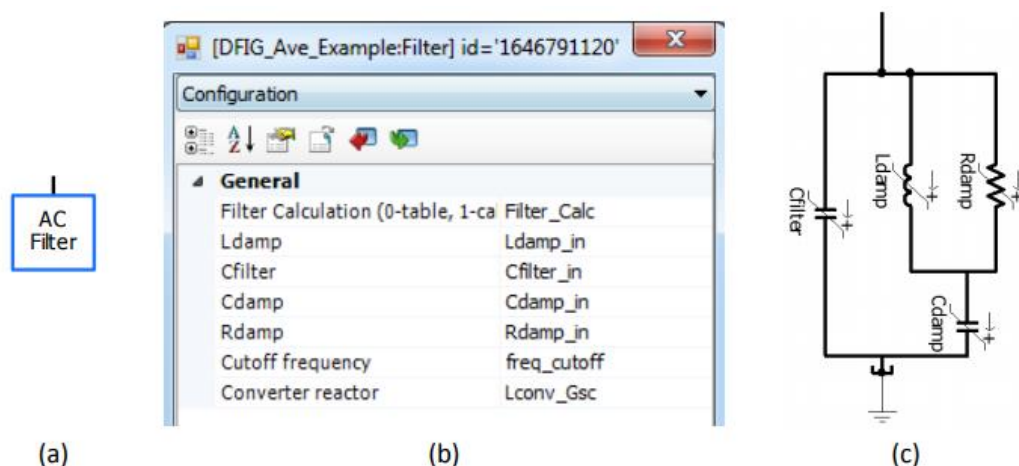


Рисунок 39 – фильтр переменного тока (а) компонент фильтра переменного тока (б) параметры (с) схема

Динамическое поведение детальной и средней моделей сравнивается в двух переходных условиях. В первом переходном процессе скорость ветра медленно изменяется вокруг его номинальной скорости, чтобы получить более низкие и более высокие значения скорости. Во втором переходном процессе на шине 1 происходит замыкание трехфазного тока на землю длительностью 0,15 с.

3.4.3 Дизельная электростанция

Модель дизельной электростанции состоит из 16 цилиндрического ДВС мощностью 12 МВт, синхронного генератора со статическим возбудителем, PI-регулятора для формирования управляющего сигнала с целью получения необходимых точности и качества переходного процесса и повышающих трансформаторов 13,8 / 20 кВ.

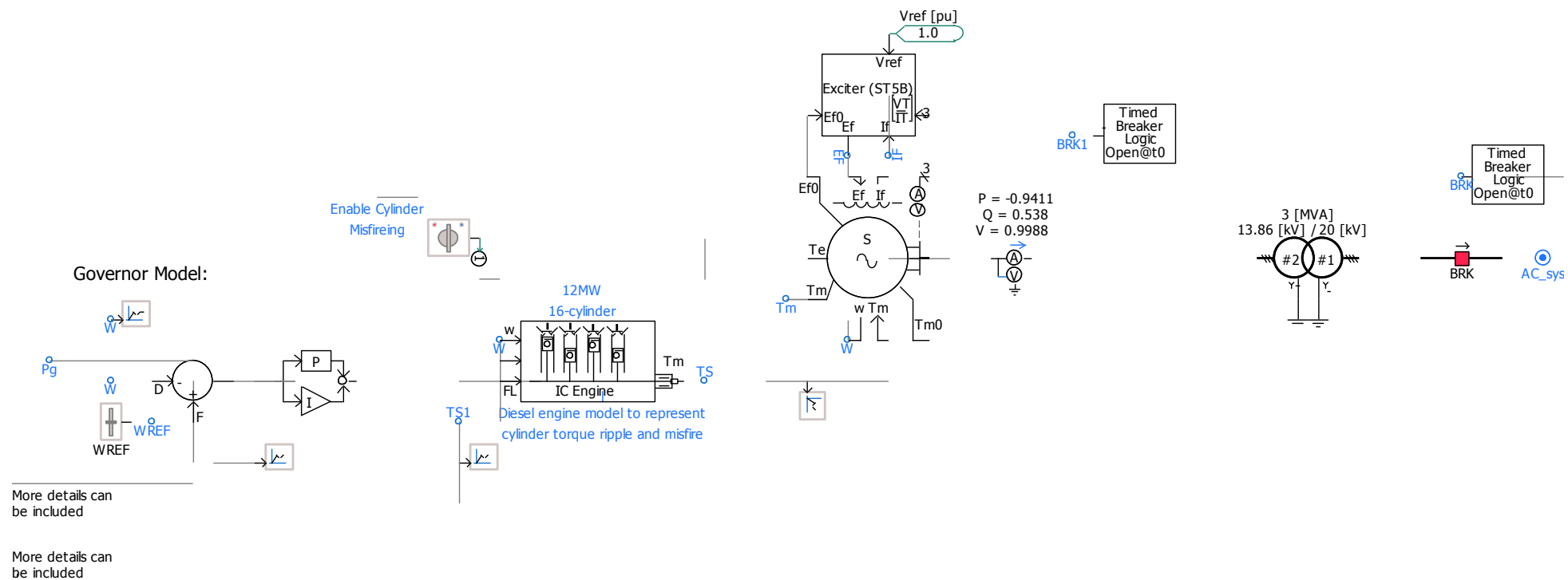


Рисунок 40 – Общая схема дизельной электростанции подключенной к сети

Контроллер двигателя представляет собой простой регулятор скорости, который поддерживает работу турбины на заданной скорости. Выходной сигнал регулятора скорости является сигналом дроссельной заслонки, который управляет подачей топлива в двигатель. Выход этого блока – механический крутящий момент, приложенный к синхронному генератору. Выходная мощность синхронного генератора рассчитана в соответствии с номинальным уровнем мощности машины. Для моделирования электрического генератора используется модель явно полюсного синхронного генератора.

3.5 Результаты моделирования схемы распределенной системы генерации в программном комплексе PSCAD

Для моделирования режима работы участка энергосистемы с объектами распределенной генерации, которые были подробно рассмотрены в разделе 1, а модели описаны в п 3.4 магистерской диссертации, установлено время моделирования 10 секунд. Шаг расчета выбран 300 μ s.

В модели схемы распределенной системы генерации в программном комплексе PSCAD предусмотрено постепенное включение генерирующих мощностей – объектов распределенной генерации, а также включение изолированной системы на параллельную работу с сетью.

Для контроля параметров режима в схеме предусмотрена установка мультиметров, отображающих значения активной и реактивной мощностей, а также напряжения в линии, которые отображаются в относительных единицах.

Результаты моделирования схемы распределенной системы генерации в программном комплексе PSCAD представлены на рисунке 41.

На рисунке 41 показаны графики активной и реактивной мощностей для всех объектов, входящих в схему распределенной системы генерации в программном комплексе PSCAD.

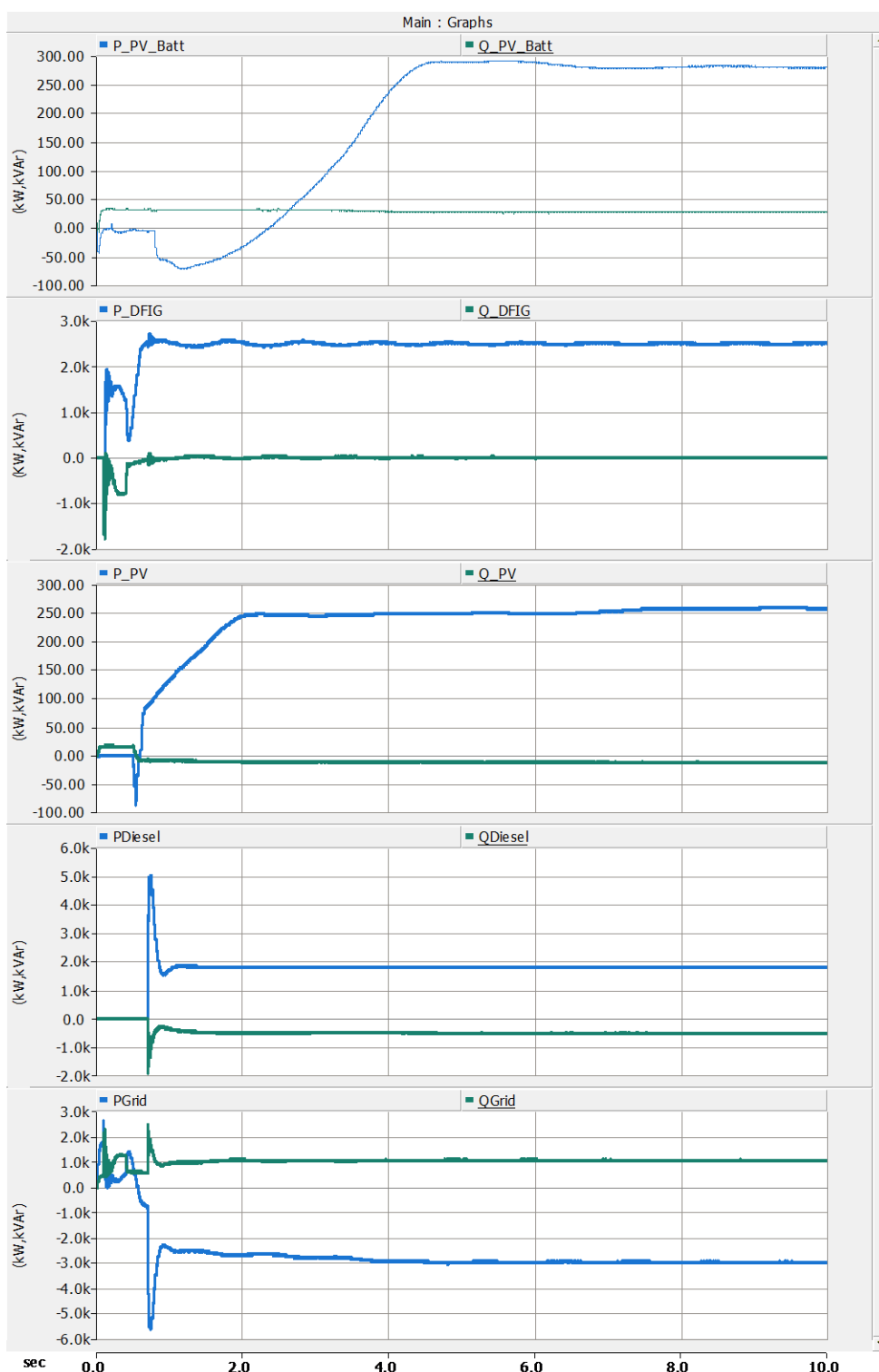


Рисунок 41 –Результаты моделирования режима работы схемы распределенной системы генерации в программном комплексе PSCAD

На рисунке 41 показаны графики P_PV_Batt и Q_PV_Batt – графики мощности для электростанции с солнечными панелями и накопителем энергии. Поэтому по графику видно, что в начальный момент времени

происходит заряд накопителя энергии, потому активная мощность, выдаваемая в сеть, снижается, но после заряда накопителя происходит выдача мощности в общую сеть. Реактивная мощность при этом находится на одном уровне и не изменяется. График зависимости выдаваемой мощности для ветроэлектростанции показывает, что реактивная мощность (Q_{DFIG}) практически не изменяется и остается на минимальном значении близком к 0. При этом активная мощность (P_{DFIG}) после выхода на установившейся режим выдает стабильное значение активной мощности. График выдаваемой мощности без накопителя энергии показывает постепенный рост выдаваемой активной мощности (P_{PV}) и стабильно низкое значение реактивной мощности (Q_{PV}). Единственный тип электрической станции, относящейся к объектам распределенной генерации и потребляющий реактивную мощность, это дизель-электростанция. Это обусловлено конструкцией дизель-генераторной установки, описанной подробно в п 3.4.3 ВКР, в конструкцию входит синхронный генератор с моделью системы возбуждения, которые обеспечивают потребление реактивной мощности из системы. При этом как видно по значениям активной мощности P_{Grid} и реактивной мощности Q_{Grid} , основная часть активной мощности выдается во внешнюю сеть, а реактивная мощность дополнительно потребляется из сети. Данная модель энергосистемы с объектами распределенной генерации может быть использована при моделировании аварийных режимов и оценке влияния объектов распределенной генерации на внешнюю энергосистему и на сами объекты РГ. Модель имеет возможность адаптации, по средствам задания параметров реальной энергосистемы, кроме того в модели предусмотрена возможность масштабирования. Размер модели в диссертации ограничен доступным числом узлов для версии Educational PSCAD.

3.6 Выводы по разделу 3

1. Для моделирования влияния объектов распределенной генерации на параметры работы электроэнергетической системы выбран программный комплекс для моделирования PSCAD, обладающий большой базой элементов из которых могут быть созданы модели для исследования, как установившихся, так и переходных режимов работы.

2. Разработана модель общей схемы распределенной системы генерации в программном комплексе PSCAD, которая позволяет выполнять оценку влияния различных объектов распределённой генерации на режимы работы электроэнергетической системы. В модели представлены два вида солнечных электростанций. Одна из которых с накопителем энергии, другая без накопителя, но реализующая алгоритм поиска точки максимальной мощности. Дизель-генераторная электростанция с синхронным генератором, а также ветроэлектростанция.

3. Выполнено моделирование режима работы общей схемы распределенной системы генерации в программном комплексе PSCAD. В результате моделирования получено, что все модели электростанций, относящихся к объектам распределённой генерации, выдают активную мощность в систему, в том числе и во внешнюю сеть, при этом потребление реактивной мощности происходит только на дизель-генераторной электростанции, так как в модели использована модель синхронного генератора и модель возбудителя синхронной машины. Потребление реактивной мощности в модели происходит из внешней электроэнергетической системы.

4. Показано, что разработанная модель общей схемы распределенной системы генерации в программном комплексе PSCAD позволяет производить оценку параметров режима электроэнергетической системы в присутствии объектов РГ. Параметры элементов модели могут быть пересчитаны под конкретные параметры объектов РГ, а сама модель может быть масштабирована с использованием уже разработанных блоков электростанций, относящихся к объектам распределенной энергетики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Влияние на параметры качества электроэнергии и режимов электроснабжения обусловлено технологией применяемых распределённых источников энергии и схемами их подключения, а также физическими вопросами подключения источника ЭЭ в непосредственной близости от потребителя, его регулированием и оперативным управлением. Влияние МГ на работу систем защиты и автоматики обусловлено перераспределением потоков мощности при параллельной работе МГ с ЦЭС в нормальном и аварийных режимах, нарушениями функционирования устройств и алгоритмов ввиду подключения дополнительного источника питания в зоне их действия

В ходе проведения диссертационной работы решены следующие задачи:

1. Выявлены основные параметры режимов работы систем внутреннего электроснабжения объектов, подверженные изменению под влиянием присоединяемых объектов малой распределенной генерации, а также причины возникновения эффекта внедрения распределенной генерации, наличие зависимости параметров режимов СЭС от типа и размерных характеристик энергоблоков МГ.

2. Разработана компьютерная модель электроэнергетической системы с присутствием объектов распределенной генерации, исследованы режимы работы электроэнергетической системы в присутствии различного числа объектов распределенной генерации.

3. По результатам произведенных расчетов выявлена целесообразность внедрения варианта модели, обладающего оптимальными характеристиками для электроснабжения рассматриваемого объекта при реализации поставленных задач.

В выпускной квалификационной работе получены следующие результаты:

1. Существующие в мировой энергетике направления развития значительных источников и их органичное совмещение с малой генерацией энергии свойственны и для России. В большой степени этому содействует активная автоматизация систем энергетики. В комбинации немалые источники и объекты малой генерации формируют современную парадигму развития энергетики.

2. Для результативного использования технологий малой энергетики необходимо изучить виды допустимых интегрированных систем, совмещающие ряд технологий малой энергетики в группе единого генерирующего комплекса, располагающегося под единым управлением.

3. Введение локальных источников питания и объектов малой генерации сопряжено с некоторыми техническими результатами, связанными с регулированием их параметров и изменением режимов электроснабжения, организации защиты и управления.

4. Распределенная генерация в ЕЭС развивается главным образом двумя путями. Малая генерация на основе углеводородных электроустановок служит по большей части собственной генерацией потребителей тепловой и электрической энергии, работающей в составе потребительских энергосистем. Малая генерация на основе ВИЭ прогрессирует в результате государственной политики поддержки возобновляемых источников энергии, появления соответствующих производителей электроустановок на основе ВИЭ и постепенного их удешевления.

5. Влияние на параметры режимов электроснабжения выражено в сложностях регулирования профиля напряжения и координации с принципами и устройствами управления в централизованных энергосистемах, а также в комплексе вопросов, связанных с изменением направления перетоков мощности и изменении параметров аварийных режимов при подключении МГ.

6. Влияние на параметры качества электроэнергии и режимов электроснабжения обусловлено технологией применяемых распределённых

источников энергии и схемами их подключения, а также физическими вопросами подключения источника ЭЭ в непосредственной близости от потребителя, его регулированием и оперативным управлением.

7. Влияние МГ на работу систем защиты и автоматики обусловлено перераспределением перетоков мощности при параллельной работе МГ с ЦЭС в нормальном и аварийных режимах, нарушениями функционирования устройств и алгоритмов ввиду подключения дополнительного источника питания в зоне их действия. Отдельным вопросом согласования работы местной и сетевой автоматики является автономизация МГ, оказывающая непосредственное влияние на правильность и надежность отдельных устройств и СВЭС потребителей в целом.

8. При обосновании и реализации проектов внедрения объектов МГ в СЭС потребителей необходимо уделять внимание определению технической совместимости, обеспечению правильного функционирования распределенных систем, координации с ЦЭС и системой внутреннего электроснабжения, повышению надежности и качества электроснабжения, достижению оптимальных эксплуатационных показателей. Для проведения технико-экономического обоснования с учетом выполнения этих задач целесообразно использовать комплексный показатель, учитывающий основные факторы многогранного влияния вновь подключаемых энергоблоков.

9. Для моделирования влияния объектов распределенной генерации на параметры работы электроэнергетической системы выбран программный комплекс для моделирования PSCAD, обладающий большой базой элементов из которых могут быть созданы модели для исследования, как установившихся, так и переходных режимов работы.

10. Разработана модель общей схемы распределенной системы генерации в программном комплексе PSCAD, которая позволяет выполнять оценку влияния различных объектов распределённой генерации на режимы работы электроэнергетической системы. В модели представлены два вида

солнечных электростанций. Одна из которых с накопителем энергии, другая без накопителя, но реализующая алгоритм поиска точки максимальной мощности. Дизель-генераторная электростанция с синхронным генератором, а также ветроэлектростанция.

11. Выполнено моделирование режима работы общей схемы распределенной системы генерации в программном комплексе PSCAD. В результате моделирования получено, что все модели электростанций, относящихся к объектам распределённой генерации, выдают активную мощность в систему, в том числе и во внешнюю сеть, при этом потребление реактивной мощности происходит только на дизель-генераторной электростанции, так как в модели использована модель синхронного генератора и модель возбуждителя синхронной машины. Потребление реактивной мощности в модели происходит из внешней электроэнергетической системы.

12. Показано, что разработанная модель общей схемы распределенной системы генерации в программном комплексе PSCAD позволяет производить оценку параметров режима электроэнергетической системы в присутствии объектов РГ. Параметры элементов модели могут быть пересчитаны под конкретные параметры объектов РГ, а сама модель может быть масштабирована с использованием уже разработанных блоков электростанций, относящихся к объектам распределенной энергетики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Альтернативная энергетика как фактор модернизации российской экономики: тенденции и перспективы: сборник научных трудов / под общ. ред. Б.Н. Порфирьева. - Москва: Научный консультант, 2016. - 212 с - Текст: электронный. - URL: <https://new.znaniium.com/catalog/product/1023661> (дата обращения: 22.03.2020)
2. Праховник А.В., Малая энергетика. Распределенная генерация в системах энергоснабжения М.: Энергоатомиздат, 2007. 464 с.
3. Меликов, А.В. Практическое применение теории надежности систем электроснабжения: учеб. пособие / А.В. Меликов. - Волгоград: ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, 2018. 80 с. Текст: электронный. - URL: <https://new.znaniium.com/catalog/product/1041850> (дата обращения: 16.02.2020)
4. Чекараш И.Н. Малая нетрадиционная и возобновляемая энергетика. Энергия из реки. Сверхмощные универсальные микро – ГЭС М.: Aegitas, 2018. 146 с.
5. Электроэнергетические системы и сети: учебное пособие / О.М. Ларин, В.И. Бирюлин, А.Н. Горлов [и др.]. 3-е изд. Москва: ИНФРА-М, 2019. 130 с. ISBN 978-5-16-108184-6. Текст: электронный. URL: <https://new.znaniium.com/catalog/product/1058860> (дата обращения: 14.02.2020)
6. Дегтярев К.С., Березкин М. Ю. Возобновляемая энергетика. Экономические оценки инвестиций. Учебно-методическое пособие КДУ: 2018. 86с.
7. Марченко О.Г., Соломин С.В. Возобновляемые источники энергии для автономных энергосистем М.: OmniScriptum Publishing KS 2017. 92 с.
8. Лагута С.А. Оборудование электростанций и сетей: Лабораторный практикум / Лагута С.А. М.: РИПО, 2015. 83 с.
9. Филиппова Т.А. Энергетические режимы электрических станций и электроэнергетических систем / Филиппова Т.А. - Новосибирск:НГТУ, 2014. 294 с

10. Фадеева Г.А. Проектирование распределительных электрических сетей / Фадеева Г.А., Федин В.Т. Мн :Вышэйшая школа, 2009. 365 с.
11. Удалов С.Н. Возобновляемые источники энергии: учеб. пособие / С.Н. Удалов. 3-е изд., перераб. и доп. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. 459с.
12. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю., Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии М.: КноРус 2012. 240 с.
13. Комплексная автоматизация в энергосбережении: учеб. пособие / Р.С. Голов, В.Ю. Теплышев, А.Е. Сорокин, А.А. Шинелёв. Москва: ИНФРА-М, 2020. 312 с.
14. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов: учебное пособие / Г.Н. Ополева. Москва: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2020. 416 с
15. Бобров А.В. Ветродизельные комплексы в децентрализованном электроснабжении [Электронный ресурс]: монография / А. В. Бобров Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 216 с. - ISBN 978-5-7638-2573-2. Текст: электронный. URL: <https://new.znaniium.com/catalog/product/492898> (дата обращения: 14.04.2020)
16. Лукутин Б.В. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: Учебное пособие / Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. Томск: Изд-во Томского политех. университета, 2015. 120 с.
17. Кашкаров А.П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции [Электронный ресурс] / А. П. Кашкаров. - Москва: ДМК Пресс, 2011. 144 с. ISBN 978-5-94074-662-1. Текст: электронный. URL: <https://new.znaniium.com/catalog/product/406891> (дата обращения: 04.01.2020)
18. Федоров В.К., Леонов Е.Н. Влияние распределенной генерации на потери и качество электрической энергии// Омский научный вестник 2016 С.7-15.

19. Шеховцов В.П. Электрическое и электромеханическое оборудование: учебник / В.П. Шеховцов. 3-е изд. Москва: ИНФРА-М, 2020. 407 с.
20. Кудинов А.А. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование: учебное пособие / А.А. Кудинов. М.: ИНФРА-М, 2020. 325 с.
21. Васильев Ю.С., Безруких П.П., Елистратов В.В., Сидоренко Г.И. Оценки ресурсов возобновляемых источников энергии в России. Справочник-учебное пособие. М: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого 2008. 251 с.
22. Тремясов В.А. Теория надежности в энергетике. Надежность систем генерации, использующих ветровую и солнечную энергию: учеб. пособие / В.А. Тремясов, Т.В. Кривенко. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. 164 с.
23. Кузьмин С. Н. Нетрадиционные источники энергии: биоэнергетика: учеб. пособие / С.Н. Кузьмин, В.И. Ляшков, Ю.С. Кузьмина. Москва: ИНФРА-М, 2019. 128 с.
24. Мамедов А.С. Тенденции современного развития возобновляемой энергетики / Дэниел Ергин; пер. с англ. – Москва: Альпина Паблишер, 2018. 944с.
25. Ананичева С. С. Модели развития электроэнергетических систем: Учебное пособие / Ананичева С.С., Мезенцев П.Е., Мызин А.Л. 2-е изд., стер. Москва: Флинта, 2018. 148 с.
26. Фортов, В. Е. Энергетика в современном мире / В.Е. Фортов, О.С. Попель. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 168 с.
27. Перепелкина Е.В., Дронова Ю.К. Организация отношений между большой и малой энергетикой. СПб.: OmniScriptum Publishing KS 2016. 290с.
28. Протасевич А.М. Энергосбережение в системах теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: учеб. пособие / А.М. Протасевич. Минск: Новое знание; Москва: ИНФРА-М, 2019. 286 с.

29. Сидорович В.К. Мировая энергетическая революция: Как возобновляемые источники энергии изменят наш мир [Электронный ресурс]/ Сидорович В. Электрон. текстовые данные. Москва: Альпина Паблишер, 2019. 208 с.

30. Германович В.А. Альтернативные источники энергии. Практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, воды, земли, биомассы [Электронный ресурс]/ Германович В., Турилин А. Электрон. текстовые данные. Санкт-Петербург: Наука и Техника, 2011. 320 с. Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/28776.html>. ЭБС «IPRbooks»

31. Кудинов В. А. Неоцененная и непризнанная "малая" энергетика: Учебное пособие / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, Е.В. Стефанюк. Москва: КУРС: НИЦ ИНФРА-М, 2015. 424 с.

32. Михальцев В.Е. Теория и проектирование газовой турбины. Часть 2. Теория и проектирование многоступенчатой газовой турбины [Электронный ресурс]: учебное пособие по курсу «Лопаточные машины газотурбинных и комбинированных установок. Газовые турбины»/ Михальцев В.Е., Моляков В.Д. Электрон. текстовые данные. Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2008. 116 с.

33. Кулуев Э.Н., Кретов Д.А. Анализ тенденций мирового развития распределенной генерации / V всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов "энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов (ЭЭПП-2019)" Тольятти: Изд-во ТГУ, 2019. 283-287 с.

34. Кулуев Э.Н. Перспективы применения распределенной генерации в региональных электроэнергетических системах / 690-692 «Молодежь. Наука. Общество» Всероссийская научно-практическая междисциплинарная конференция Тольятти: Изд-во ТГУ, 2019. 690-692 с.

35. Кулуев Э.Н. Механизм стимулирования совместного использования распределенных энергоресурсов / Студенческие дни науки в ТГУ: научно-

практическая конференция: сборник студенческих работ. М.: Изд-во ТГУ; Тольятти, 2019. 189 с.

36. Кретов Д.А., Костюков В.Д. Разработка методики расчёта срока окупаемости собственного источника питания промышленного предприятия на основе газопоршневой установки. *Фундаментальные исследования*. – 2019. - №8. 42-46 с.

37. Кулуев Э.Н., Кретов Д.А. Анализ особенностей создания и развития микросетей в условиях российской энергетики / XLVIV Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы «ФЁДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2019» Издательский дом МЭИ (Москва), 2019. 295 с.

38. Смоленцев М.Д., Голубев А.Д., Громяко В.П., Цаль В.А. *Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении*. М.: Энергоатомиздат, 2014. 351 с.

39. Безруких А.В. *Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России*. СПб.:Наука, 2016. 294 с.

40. Антонов А.П. *Режимы электрических систем: Монография*. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2015. 258 с.

41. Абоян С.Т. *Электроэнергетические системы и сети. Расчеты, анализ, оптимизация режимов работы и проектных решений электрических сетей*. Учебное пособие М.: Издательство Юрайт, 2017. 360 с.

42. Давыдова Е.Ю. *Электроэнергетические системы и сети. Электромеханические переходные процессы*. Учебное пособие для прикладного бакалавриата М.: Высшая школа, 2015. 709с.

43. Палашин А.К., Петрунин О.К. *Инновационное развитие альтернативной энергетики* М.: Колос-Пресс, 2014. 424 с.

44. Phadke. A, Improving the performance of power system protection using wide area monitoring systems [Text]/ A. Phadke, P. Wall, V. Terzija// *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. – 2016. Vol.4, iss.3, pp. 319-331. – The Author(s), 2016. URL: <https://link.springer.com/>

45. Sensitivity Analysis of Time Length of Photovoltaic Output Power to Capacity Configuration of Energy Storage Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doaj.org/article/9bb68c697a004f89940bf86cf8f07cae>

46. Castellani, V. Research findings and decision making: the case of renewable energy [Text]/ V. Castellani, A. Piazzalunga. S. Sala// Environmental Sciences Europe. 2014. URL: <https://enveurope.springeropen.com/>

47. Chen, L. Conceptual design of a high-speed electromagnetic switch for a modified flux-coupling-type SFCL and its application in renewable energy system Open Access. – The Author(s), 2016. URL: <https://springerplus.springeropen.com>

48. Oureilidis, K. Frequency-based control of islanded microgrid with renewable energy sources and energy storage [Text]/ K. Oureilidis, E. Bakirtzis, C. Demoulias// Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. – 2016. – Vol.4, iss.1, pp. 54-62. The Author(s), 2016. URL: <https://link.springer>.

