

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Ареф Махмуд Махрос Амери

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ
ПРИ РАСЧЕТЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЛОКАЛЬНЫХ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ЕГИПТА**

05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные электрические системы» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Обоскалов Владислав Петрович

Официальные оппоненты: **Герасименко Алексей Алексеевич**,
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет», г.
Красноярск, профессор кафедры электрических
станций и электроэнергетических систем;

Зюзов Анатолий Михайлович,
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО
«Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина», г.
Екатеринбург, профессор кафедры электропривода
и автоматизации промышленных установок;

Мезенцев Петр Евгеньевич,
кандидат технических наук, ФГБУН Институт
теплофизики Уральского отделения Российской
академии наук, г. Екатеринбург, ученый секретарь.

Защита состоится 02 июня 2020 г. в 13:30 ч на заседании диссертационного совета
УрФУ 05.02.03 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого
совета).

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на сайте
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
<https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1209>

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Самойленко Владислав Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. За последние десятилетия в мировой электроэнергетике наблюдаются кардинальные структурные изменения, вызванные бурным развитием генерирующих объектов, функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Во многом это связано с развитием силовой электроники и существенным снижением цен на преобразователи электрической энергии, благодаря чему стало возможным и доступным индивидуальное производство электрической энергии. Среди технологий производства электроэнергии с использованием ВИЭ, наиболее быстрыми темпами развивается преобразование энергии ветра и солнца. В большей степени это характерно для регионов с благоприятными для производства электрической энергии на основе использования ВИЭ климатическими условиями (морские побережья, с относительно большой скоростью ветра и страны с достаточно высоким уровнем солнечной радиации).

Египет с его протяженной береговой линией, и практически круглый год безоблачным небом и малыми запасами органических видов топлива, в наибольшей степени удовлетворяет условиям развития распределенной генерации (РГ) на базе ВИЭ. Здесь возобновляемые ресурсы позволяют производить электроэнергию не только индивидуально, но и централизованно, с высокой экономической эффективностью на электростанциях с генерирующими установками, достаточно большой единичной мощности. Интенсивность солнечной энергии по стране составляет от 5 до 8 кВт·ч/м² в день и 2300 кВт·ч/м² в год (в течение 3000-4000 часов в год). Скорость ветра на побережье Красного моря превышает 10 м/сек с потенциалом выработки электроэнергии 400–800 Вт/м² на высоте 40 м над уровнем земли при установке ветроэнергетических установок ВЭУ.

Дополнительным фактором развития РГ на базе ВИЭ является необходимость электрификации отдаленных районов Египта. Согласно данным Управления по новым и возобновляемым источникам энергии (NREA), в Египте около 167 000 домохозяйств (264 деревень) либо полностью лишены доступа к электроэнергии, либо испытывают острую потребность в ней. В 211 деревнях электроснабжение отсутствует полностью, а в 53 питание осуществляется только от автономных дизельных электростанций. Подавляющее большинство из этих деревень расположено в пустынных районах, где наблюдается мощный потенциал использования солнечной энергии, а в некоторых местах и энергии ветра.

Необходимо отметить, что последние четыре года электроэнергетика Египта находится в кризисном состоянии – в часы максимальных нагрузок наблюдается дефицит электрической мощности, что приводит к частичным отключениям электроэнергии, которые в ряде городов достигают до двух-четырех часов в день, а в некоторых сельских районах перерывы питания превышают 8 часов в день. Выход из создавшегося кризиса Египетское правительство видит в развитии РГ на ВИЭ. Освоение солнечной энергии началось со строительства солнечной тепловой электростанции мощностью 20 МВт в Кураймате, на юге Египта. В 2015 году в оазисе Сива в Западной Сахаре была введена в эксплуатацию фотоэлектрическая станция мощностью 10 МВт. Примером использования ветровых ресурсов может служить район Зафарана. Возможности использования ВЭУ в данном районе оцениваются в 425 МВт. Планируется строительство в Суэц-Гольфе ветровой электростанции мощностью 250 МВт, фотоэлектрической электростанции 200 МВт в Асуане (Комомбо) и ряда электростанций на ВИЭ общей установленной мощностью 550 МВт к западу от реки Нил.

Неотъемлемой частью РГ являются инверторы. За счет малых коммутационных потерь, возможности использования на высоких классах напряжения и быстрого динамического

отклика при управлении, на средних и высоких классах напряжения в настоящее время рекомендуется использовать многоуровневые инверторы. Так уже разработаны высокоэффективные трехфазные, трехуровневые инверторы с фиксированной нулевой точкой и LCL фильтрами, позволяющие получать напряжение на выходе с минимальными гармоническими искажениями. Именно этот, преобразовательный блок электроустановки открыл возможности широкого использования генерации на ВИЭ.

Однако, наряду с высоким потенциалом развития в Египте РГ на базе ВИЭ существует ряд факторов, ограничивающих ее применение. К их числу относятся: необходимость государственного субсидирования, вызванная относительно высокой стоимостью солнечных фотоэлектрических установок (СФЭУ) и ВЭУ; высокая вероятность выделения на изолированную работу отдельных районов сельской местности, удаленных от централизованной распределительной сети; недостаточность инженерного обеспечения; недостаточность квалификации инженеров-электриков; недостаточная точность математических моделей, определяющая несоответствие расчетных и реальных величин при расчетах нормальных и аварийных режимов распределительных сетей с распределенной генерацией на базе ВИЭ).

Погрешность требуемых для настройки систем РЗА и управления расчетных величин в первую очередь относится к расчетным токам КЗ – практика показала, что расчетные величины существенно завышены из-за неадекватного учета функциональных характеристик источников питания. В результате, в Египте в настоящее время актуальна проблема более точного моделирования устройств генерации с преобразователями, очевидна необходимость пополнения баз данных и знаний для обеспечения требуемого качества проектных продуктов и принятия адекватных решений при эксплуатации РГ на ВИЭ.

Сооружение РГ на базе ВИЭ привносит новые технологические проблемы в работу электроэнергетических систем (ЭЭС), такие как колебания частоты и напряжений, увеличение токов коротких замыканий (КЗ) в распределительных сетях, ухудшение устойчивости системы, снижение качества электроэнергии и др. Для демпфирования отмеченного негативного влияния генерации на ВИЭ, стандартами регламентируется способность энергоустановок, в частности ВЭУ, поддерживать генераторный режим при глубоком снижении напряжения, что необходимо как для поддержания режима работы электроустановки параллельно с сетью, так и для уменьшения диапазона колебаний напряжения при неплановых режимах работы ЭЭС, в том числе при кратковременном снижении напряжения в электрической сети. Данная функция реализуется системой автоматического управления (САУ) током и напряжением и существенно влияет на параметры математической модели электроустановки в целом.

Развитие РГ относительно малой мощности привело к появлению локальных электрических сетей (ЛЭЭС) (microgrid), в составе которых используются распределенные по электрической сети источники и накопители электроэнергии, с возможностью работы ЛЭЭС как параллельно с основной распределительной электрической сетью (ОРЭС), так и изолировано от нее. К ЛЭЭС предъявляются требования работы как в режиме экспорта, так и импорта электроэнергии, с возможностью регулирования потоков активной и реактивной мощности. При этом управление ЛЭЭС осуществляется собственной автоматизированной системой управления, что в свою очередь, отражается на параметрах нормальных и аварийных режимов, в том числе и на режимах КЗ в ЛЭЭС.

В настоящее время доминирующими являются электроприемники и электрические сети переменного тока. Однако локализация производства электрической энергии, а также

необходимость применения преобразователей частоты, где промежуточной является ступень постоянного тока, вызывают интерес к развитию систем распределения и потребления энергии на постоянном токе. Использование постоянного тока имеет свои плюсы, в числе которых, как правило, отмечается отсутствие гармонических составляющих и перетоков реактивной мощности. Развитие сетей постоянного тока приводит к появлению гибридных электрических систем.

Подключение ЛЭЭС к существующим распределительным сетям, усложняет структуру последних, приводит к реверсивным потокам энергии, увеличению токов КЗ. Компоненты силовой электроники создают дополнительные факторы, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации энергоустановок. Примером является сверхпроводящий ограничитель тока (COT). Математическая модель бифильарного резистивного COT формируется на основе степенного закона. Отсюда COT создают дополнительные нелинейные функциональные свойства РГ, которые необходимо учитывать при анализе токов КЗ в ЛЭЭС.

Одной из задач анализа режимов работы ЛЭЭС является расчет токов КЗ. Как правило, такие расчеты выполняются с большим числом ограничений и допущений, сводящих задачу к методам применимым для расчета токов КЗ с преобладанием традиционных источников питания (ИП). При этом специфика устройств генерации на базе ВИЭ практически не учитывается, что приводит к существенной погрешности результирующих величин. В большей степени это относится к ударному току и аperiodической составляющей тока КЗ, но и установившееся значение тока КЗ определяется наличием или отсутствием COT. Функция ВЭУ поддерживать генераторный режим работы при провале напряжения, приводит к снижению внешнего тока КЗ. В результате источники РГ на базе ВИЭ должны рассматриваться при моделировании как функциональные источники тока. Решению проблемы учета индивидуальных свойств ИП с конверторами при расчете токов КЗ посвящена представленная диссертационная работа.

Степень научной разработанности темы исследования. Имеется достаточно большое число научных публикаций, посвященных РГ на базе ВИЭ. В основном они посвящены вопросам концептуального развития и организации ЛЭЭС; конструктивному исполнению отдельных узлов генерирующих устройств; моделированию работы; анализу переходных процессов; анализу устойчивости работы ИП; разработке схем защиты при различных режимах работы ЛЭЭС. В то же время, число публикаций по расчету токов КЗ в наиболее известных иностранных журналах исчисляется единицами.

Среди ученых России существенный вклад в развитие теории управления и повышения эффективности РГ внесли: постоянно действующий в УрФУ под руководством П.М. Ерохина, А.В. Паздерина, С.А. Ерошенко и В.О. Самойленко семинар «Проблемы подключения и эксплуатации малой генерации при параллельной работе с ЕЭС России», а также ученые: Н.И. Воропай, А.Ф. Дьяков, П.В. Илюшин, В.В. Тарасенко, А.Г. Фишов, Среди зарубежных исследователей следует особо отметить: Xiaohang Jin, Liyan Qu, J. Yang, J.E., Fletcher, Md, Michael Negnevitsky, Julia A. Belk, Konstantin Turitsyn, Jiahui Zhua, Xiaodong Zhenga, Ming Qiua, Zhipeng Zhang, Mazen Abdel-Salam, Khairy Sayed, Canbing Li, и др.

Цель работы. Целью настоящего исследования является: разработка методики и алгоритма расчета токов КЗ в локальных электрических системах с распределенной генерацией на ВИЭ.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ функциональных свойств ВЭУ с конверторами для их учета в расчетах токов КЗ.

2. Разработка структуры программно-аппаратных симуляторов основных систем ИП с конверторами, а также их систем управления с целью: выявления значимых для расчета токов КЗ характеристик; проверки необходимости установки фильтров гармонических составляющих и проверки всех разрабатываемых вычислительных процедур.

3. Разработка математической модели отслеживания траектории максимальной мощности как определяющей функции симулятора СФЭУ.

4. Разработка вычислительных процедур расчета токов КЗ в ЛЭЭС с РГ на базе ВИЭ.

5. Выполнение тестовых расчетов токов КЗ с целью отладки вычислительных процедур.

Объектами исследования являются: ЛЭЭС с РГ на базе ВИЭ; ВЭУ с СГПМ; СФЭУ, подключенная к трехфазному, трехуровневому инвертору с фиксированной нулевой точкой; гибридные локальные ЭЭС с выделением подсистем на постоянном и переменном токе.

Научная новизна:

1. Разработана методика учета токоограничивающих свойств генерирующих устройств на ВИЭ при расчетах токов КЗ в локальных электроэнергетических системах.

2. Предложена структурно-математическая модель электрогенерирующих устройств на базе ВИЭ с преобразователями и системами управления для анализа их работы в режиме КЗ.

3. Разработана математическая модель ЛЭЭС с распределенной генерацией на базе ВИЭ.

4. Разработана математическая модель отслеживания траектории максимальной мощности, как определяющей функции симулятора СФЭУ;

Теоретическая и практическая значимость. Работа полностью ориентирована для решения основных технических проблем, вызванных внедрением в энергосистеме Египта РГ на базе ВИЭ. Работа выполнена в рамках целевой программы развития электроэнергетики в Египте. Разработанные программные процедуры расчетов токов коротких замыкания могут быть использованы в учебном процессе и стать основой при разработке программного комплекса расчета нормальных и аварийных режимов в локальных ЭЭС с РГ на базе ВИЭ.

Методология и методы исследования. При проведении исследования использовались теоретические основы электротехники, методы оптимизации и нелинейного программирования, а также методы решения систем линейных и нелинейных уравнений. При программировании микроконтроллера использовался алгоритмический язык C++. Верификация получаемых результатов выполнялась на тестовых схемах IEEE в интерактивной среде MatLab Simulink.

Основные положения диссертационного исследования, выносимые на защиту:

1. Моделирование РГ на базе ВИЭ с выделением подсистем, определяющих токи КЗ;

2. Математическая модель отслеживания траектории максимальной мощности СФЭУ при параллельной работе ЛЭЭС с основной распределительной сетью и в изолированном режиме;

3. Модифицированный метод расчета токов КЗ;

4. Оценка показателей режимной надежности ЛЭЭС на базе случайных делений системы на подсистемы в послеаварийных режимах.

Достоверность проведенных исследований подтверждается результатами вычислительных экспериментов на тестовой схеме IEEE 33, анализом и сопоставлением полученных результатов с существующими аналогами.

Личный вклад автора заключается в разработке математических моделей РГ на базе ВИЭ для анализа нормальных и аварийных режимов работы ЭЭС. Автором разработан алгоритм управления для отслеживания траектории максимальной мощности СФЭУ при использовании в качестве микроконтроллера Arduino Nano 3х. Предложен метод расчета токов

КЗ ЛЭЭС. По всем обсуждаемым методам с помощью разработанных автором программных процедур выполнены тестовые расчеты.

Апробация результатов работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на 4-х конференциях:

1. IV Российская молодежная научная школа-конференция «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи» (Томск, 2016).
2. 6-я Международная научно-практическая конференция «Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии ЭКСИЭ-06» (Екатеринбург, 2017).
3. IEEE 58th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2017
4. IEEE 59th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2018.

Публикации. По результатам исследования опубликовано 8 научных работ, из них 4 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, включая 3 статьи в зарубежных изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, и двух приложений. Содержит 164 страницу, включает 95 рисунков и 20 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность выполненного исследования, сформулированы цели, задачи и научная новизна работы, охарактеризована практическая ценность результатов исследования, выделены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Представлен анализ режимов работы наиболее распространенного в Египте типа ВЭУ с синхронным генератором на постоянных магнитах (СГПМ) с целью выявления основных функциональных характеристик устройства, определяющих ток внешнего КЗ. Выявлено, что наибольшее влияние на величину токов КЗ оказывают: устройство токовой защиты ВЭУ; устройство защиты от превышения допустимой частоты вращения ротора генератора ВЭУ и система автоматического регулирования при выполнении функции сохранения генераторного режима ВЭУ при снижении напряжения во внешней цепи в течение заданного времени. Для анализа установившихся и переходных процессов в ВЭУ при фиксированной и переменной скоростях ветра в среде MATLAB-Simulink разработана структурная и математическая модель электрической сети с ВЭУ. Система дифференциальных уравнений, описывающих СГПМ, была принята неизменной для встроенных в программное обеспечение MATLAB типов СГПМ. Аналогичное замечание относится к системам управления конверторов.

Представлена схема защит ВЭУ, работающих параллельно с сетью. Работа ВЭУ требует учета особенностей физических процессов, имеющих место как в процессе преобразования энергии ветра в электрическую, так и при передаче ее потребителям. В частности, ВЭУ с СГПМ подключается к сети через два конвертора напряжения, расположенных соответственно со стороны ВЭУ и со стороны сети (back-to-back converter). Для защиты ВЭУ от превышения допустимой частоты вращения турбины при внешних КЗ, в ходе поддержания генераторного режима, а также при недопустимом повышении напряжения ступени постоянного тока, параллельно к шинам постоянного тока ВЭУ подключается тормозной резистор. Защиту от импульсов перенапряжения обеспечивает конденсатор в цепи постоянного тока. Защиту ВЭУ от недопустимой частоты вращения ротора

обеспечивает система регулирования угла лопастей ветротурбины. Как правило, регулирование угла наклона лопасти осуществляется в пределах 5-10 градусов в секунду. Данная скорость относительно мала для динамического регулирования переходных процессов. В этой связи, регулирование скорости вращения турбины ВЭУ путем изменения угла наклона лопастей рассматривается только в качестве вспомогательного, к тормозному резистору, метода регулирования.

На рисунке 1 представлена схема ВЭУ с СГПМ. Конвертор на стороне генератора регулирует скорость вращения ротора ВЭУ для сохранения максимально эффективного режима работы при переменной скорости ветра. При изменении скорости ветра конвертор регулирует ток статора генератора по оси q , что приводит к изменению электромагнитного момента генератора, таким образом, чтобы относительная скорость вращения несущего винта была оптимальной. Через основной конвертор (со стороны электрической сети) активная мощность передается от ВЭУ в сеть с заданным коэффициентом мощности. В схеме управления конвертором используются PI-регуляторы с каскадными контурами управления, где внешние контуры управления предназначены для регулирования напряжения постоянного тока и реактивной мощности, а внутренние контуры управления – для регулирования тока со стороны сети. В нормальных режимах работы управление с двойной обратной связью выполняется только по оси d . В аварийных режимах работы выходной активный и реактивный ток основного конвертора определяется стратегией управления. Падение напряжения в аварийном режиме ограничивает выходную мощность ВЭУ. Если выходная мощность ВЭУ избыточна и ее выдача в полном объеме невозможна, то она может вызвать перенапряжение в цепях постоянного тока, ставя под угрозу безопасную работу конверторов. Система контроля угла наклона лопастей ВЭУ поддерживает номинальные параметры выдаваемой мощности при сильном ветре.

С целью выявления специфических свойств ВЭУ были рассмотрены нормальный и аварийный (КЗ) режимы ВЭУ. Анализ установившегося режима, предшествующего моменту возникновения КЗ необходим в первую очередь для определения начальной величины ЭДС генератора. В анализируемых режимах рассматривалась установленная на ВЭС Зафарана ВЭУ, мощностью 1,5 МВт с номинальным напряжением 575 В., подключенная к электрической сети через трансформатор мощностью 2 МВА, с коэффициентом трансформации 0,575/25 кВ. К шинам переменного тока подключена нагрузка 1.5 МВт

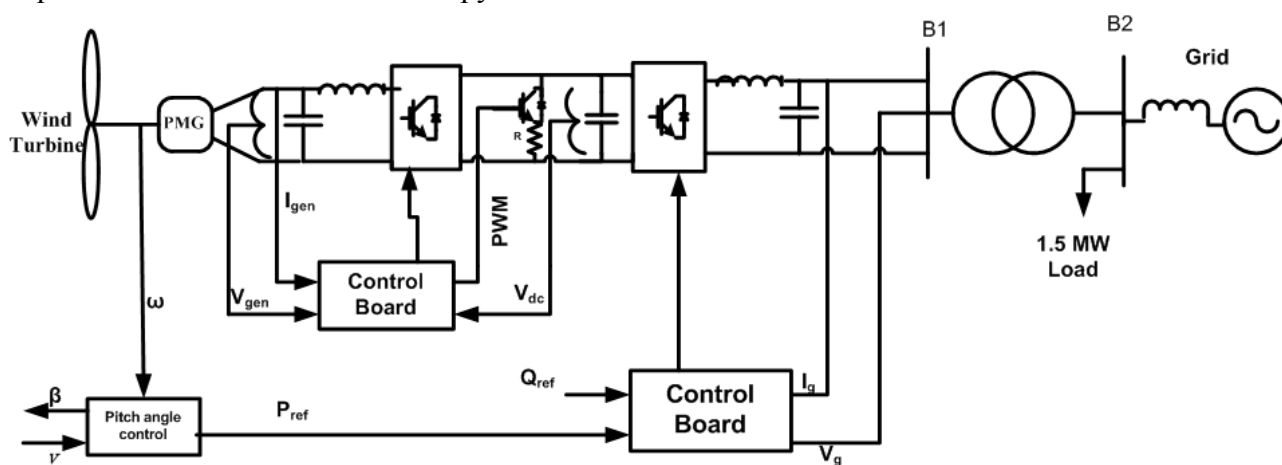


Рисунок 1 — ВЭУ подключенная к сети

В установившемся режиме при фиксированной скорости ветра 12 м/с (максимальная скорость ветра для района Зафарана в Египте) скорость вращения ротора генератора составляет 1,06 о.е., выходное напряжение ВЭУ – 0,98 о.е. выходная мощность – 1330 кВт.

На рисунках 2 и 3 показаны полученные в результате моделирования соответственно P-V и I-V характеристики ВЭУ 1,5 MW с генератором СГПМ. Нетрудно видеть, что характеристики имеют нелинейный характер, где выходная мощность и ток увеличиваются с увеличением выходного напряжения.

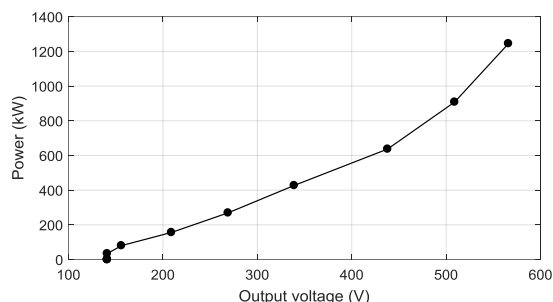


Рисунок 2 – P-V характеристики ВЭУ

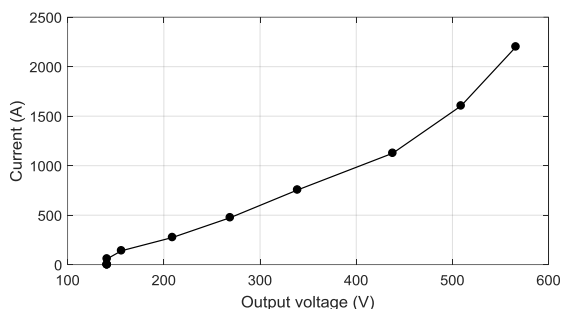


Рисунок 3 – I-V характеристики ВЭУ

Анализ аварийных режимов. Для анализа переходных процессов был рассмотрен режим трехфазного КЗ в точке подключения ВЭУ к распределительной сети при параллельной работе с ОРЭС и изолированно от нее. При моделировании было принято: момент возникновения КЗ $t=7\text{с}$ (для исключения начальных переходных процессов); продолжительность КЗ равна 140 мс (время срабатывания релейной защиты и силовых выключателей). На Рисунок 4 представлены полученные в результате моделирования КЗ за трансформатором графики скорости турбины (рисунок 4.а) и тока на выходе конвертора ВЭУ (4.б) при наличии и отсутствии устройства для поддержания генераторного режима работы при просадке напряжения LVRT (Low-Voltage Ride-Through). Скорость ветротурбины возрастает в диапазонах от 1,065 в момент возникновения КЗ до 1,1 при $t=7,4\text{с}$; убывает от 1,1 до 1,055 на интервале $t=(7,4-8,6)$ и колебательно, с периодом 2,4 с. сходит к начальной скорости 1,065. При наличии LVRT размах колебаний снижается до уровня (1,08-1,065).

Как показано на 4(б), после отключения КЗ выходной ток конвертора при наличии LVRT практически мгновенно снижается и с небольшим диапазоном осцилляции и достаточно быстро восстанавливается до установившегося значения, в то время как при отсутствии LVRT переходные процессы имеют более тяжелый характер.

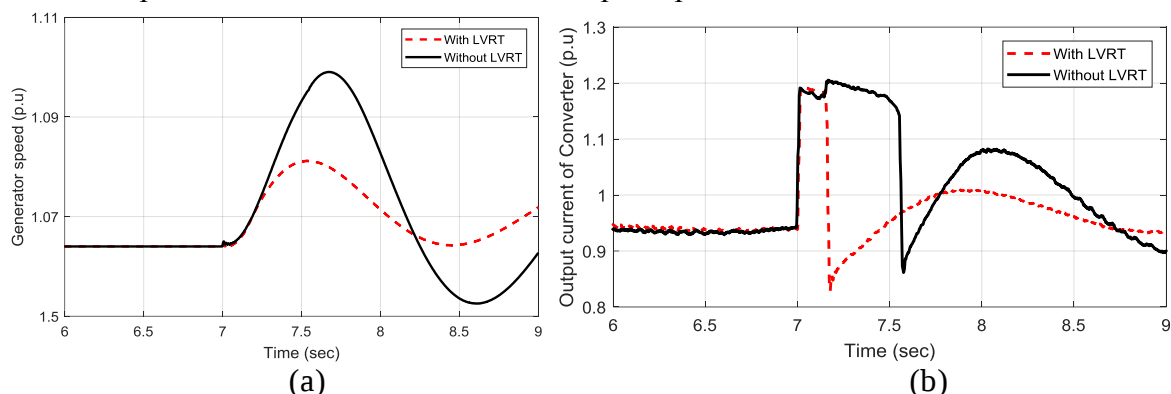


Рисунок 4 — Графики скорости турбины (а) и тока на выходе конвертора ВЭУ с генератором PMSG (б) при наличии и отсутствии LVRT при КЗ за трансформатором.

Анализ переходных процессов при удаленных коротких замыканиях в ЛЭЭС выполнялся согласно рисунку 1 при удаленном КЗ на фидере в точке В2. На рисунке 5 показаны полученные в результате моделирования выходной ток конвертора ВЭУ и ток от основной электрической сети при различной удаленности КЗ. В процессе КЗ выходной ток конвертора возрастает до предельного значения 63 А. При этом основной ток КЗ идет со ОРЭС. После отключения КЗ выходной ток конвертора ВЭС колебательно стабилизируется до

нового уровня, определяемого остаточной нагрузкой. Расчеты показывают, при КЗ в режиме параллельной работы ЛЭЭС с ОРЭС большая часть тока КЗ приходится на долю основной электрической сети. Определяющим фактором для ВЭУ является ограничение тока конвертора.

Эквивалентные сопротивления. В расчетах токов КЗ источники питания, как правило, задаются ЭДС и эквивалентным сопротивлением, зависящим от интервала времени протекания переходного процесса: продольное сверхпереходное, x_d'' (на интервале (0–0,02) сек), продольное переходное, x_d' (на интервале (0,02–0,1) сек), и синхронное x_d индуктивные сопротивления по продольной оси,. Для генерирующих установок с конверторами данные сопротивления отличаются от тех, что приводятся в справочниках для генераторов соответствующих типов и мощностей, поскольку они зависят от системы регулирования конвертора. Оценка сопротивлений рассматриваемых энергоустановок выполнена моделированием переходных процессов в среде MATLAB-Simulink. В таблице 1 представлены результаты моделирования процесса КЗ и расчетные сопротивления, соответствующие переходному процессу, с учетом апериодической составляющей тока КЗ, которая может быть аппроксимирована уравнением: $i_a(t) = (4671 - 3552)e^{(-\frac{t}{0,02})} + 3552$.

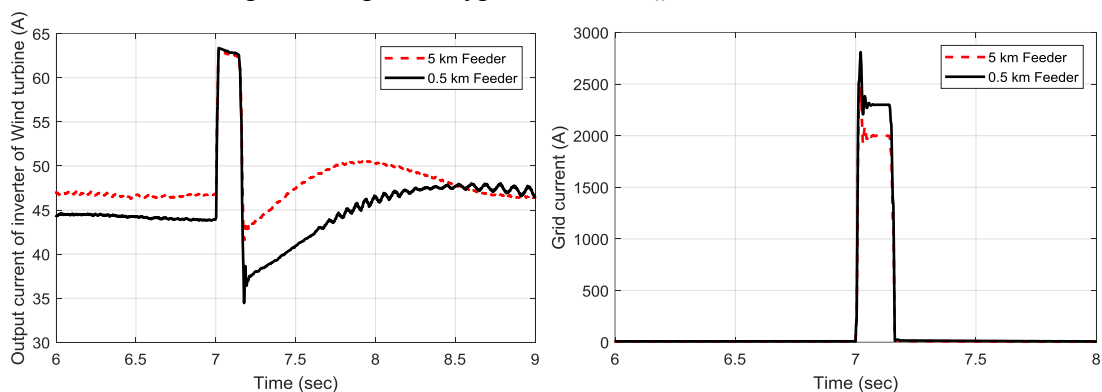


Рисунок 5 – Выходной ток конвертора и ток от основной сети при удаленном КЗ.

Таблица 1 – Параметры генерирующей установки

$E(\text{В})$	$I(\text{А})$	$I'(\text{А})$	$I''(\text{А})$	$x(\text{Ом})$	$x'(\text{Ом})$	$x''(\text{Ом})$
500	1470	3552	4671	0,34	0,14	0,11

Ветроэлектростанция. На рисунке 6 представлена принципиальная электрическая схема ветроэлектростанции (ВЭС), включающая в себя совокупность ВЭУ, секционированное распределительное устройство среднего напряжения, трансформаторы с расщепленной обмоткой низкого напряжения, распределительное устройство высокого напряжения. Линиями электропередачи ВЭС подключена к основной распределительной сети высокого напряжения. Как правило, на одну секцию среднего напряжения подключается несколько ВЭУ (в тестовых расчетах до 10).

Система защиты на ВЭС представляет собой совокупность 4 иерархически резервирующих блоков: блок ВЭУ – защита ВЭУ от превышения допустимой скорости вращения, СГПМ от внутренних повреждений, электронных ключей конверторов, и энергоблока в целом (отключение блока осуществляется выключателем СВ1); секционный блок – защита блочной совокупности ВЭУ от повреждений и отказов силовых выключателей и непосредственно секции, на которую скоммутированы ВЭУ (отключение секции осуществляется выключателем СВWF); защита трансформаторов (отключение соответствующим силовым выключателем высокого напряжения); Распределительное

устройство высокого напряжения, на которое скоммутированы линии электропередачи, соединяющей ВЭС с ОРЭС. Отключение ЛЭП осуществляется выключателями CBgrid. Координация коммутаций выключателями зависит от зоны возникновения неисправности: каждая последующая зона резервирует предыдущую.

Комплекты релейной защиты всех зон, кроме первой, не имеют специфических особенностей и могут быть реализованы стандартными панелями. Защита ВЭУ включает в себя не только электрические, но и механические и электронные принципы защиты, в том числе защиту от превышения тока конверторов.

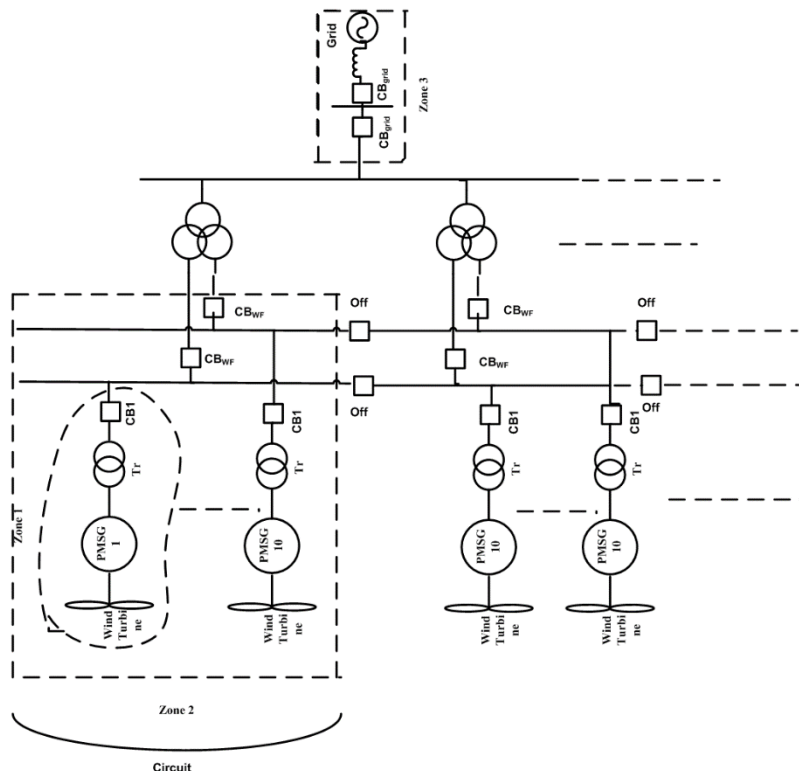


Рисунок 6 — Принципиальная электрическая схема ВЭС

Глава 2. Показано, что основной функциональной характеристикой СФЭУ, учет которой необходим при анализе как нормальных, так и аварийных (в том числе при коротких замыканиях) режимов является траектория максимальной мощности, построенная на множестве вольт-амперных характеристик СФЭУ. С целью симуляции системы управления СФЭУ при проектировании и обучении рассмотрена возможность использования микроконтроллера Arduino Nano 3x в системе управления СФЭУ. Для этого разработан программно-аппаратный вычислительный комплекс.

Представлен алгоритм цифрового управления для отслеживания точки максимальной мощности (ТММ) для двух вариантов работы СФЭУ: изолированной и параллельной с ОРЭС работы ЛЭЭС. В качестве преобразователя постоянного тока в переменный рассматриваются конверторы с фиксированной нулевой точкой. Анализируется влияние параметров LCL фильтра на снижения уровней гармонических составляющих тока и напряжения.

При реализации симулятора системы управления СФЭУ предложен основанный на методе возмущения-и-наблюдения (Perturb-and-observe (P&O)) алгоритм отслеживания ТММ. Алгоритм требует наличия базы данных вольт-амперных характеристик (ВАХ) СФЭУ. Управление режимом работы СФЭУ в зависимости от режима ЛЭЭС, а также хранение справочных данных для ТММ осуществляется функциями микроконтроллера. Гармонические

составляющие выходного напряжения многоуровневого трехфазного конвертора регулируются методами широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Идея метода Р&О заключается в расчёте выходной мощности $P^{(k)}$ на шаге k для заданных значений тока и напряжения, и сопоставления полученных результатов со значениями $P^{(k-1)}$ на шаге $(k-1)$. При увеличении мощности на выходе, $P^{(k)} > P^{(k-1)}$ напряжение смещения изменяется (увеличивается или уменьшается) в направлении предыдущего шага; в противном случае изменение осуществляется в противоположную сторону. Число шагов определяется конвертором. Предлагается использовать трёхуровневый конвертор (рисунок 7) с фиксированной нулевой точкой, который по сравнению с другими вариантами исполнения конверторов, характеризуется относительно низким коэффициентом гармонических искажений (36,22%) и высоким КПД (98,93%).

Анализ характеристик LCL фильтра условно разделен на два этапа. Первый этап связан с подбором требуемой индуктивности со стороны конвертора (L_i). В рамках второго этапа выполняется подбор индуктивности и емкости (L_g, C_f) со стороны сети, которые выполняют роль низкочастотного фильтра.

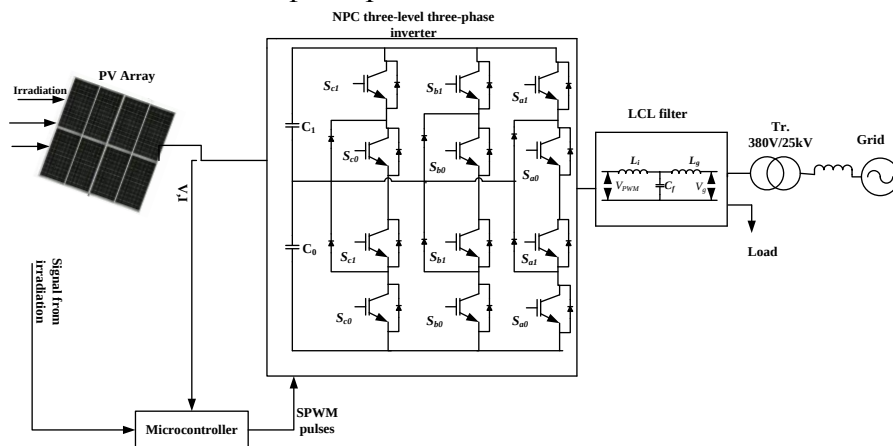


Рисунок 7 – СФЭУ подключенная к ЭЭС

Управление выходной мощностью СФЭУ основано на методах ШИМ. ШИМ-сигнал генерируется аналоговым компаратором, на один вход которого подаётся вспомогательный опорный пилообразный сигнал, значительно большей частоты, чем частота модулирующего сигнала, а на другой — модулирующий непрерывный аналоговый сигнал. Ширина импульса изменяется пропорционально амплитуде синусоидальной волны аналогового сигнала.

Алгоритм управления. Для получения ТММ СФЭУ выполняется следующий алгоритм действий:

1. Задается уровень солнечной инсоляции, которая с шагом 100 Вт/м^2 варьируется в диапазоне от 100 Вт/м^2 до 1000 Вт/м^2 .
2. Функциями микроконтроллера Arduino Nano путем изменения амплитуды синусоидальной волны модулирующего сигнала ШИМ методом Р&О определяется решение для ТММ.
3. В память микроконтроллера записываются ТММ и значения амплитуды модулирующего сигнала.
4. Меняется уровень солнечной инсоляции и расчеты повторяются с п.2 до полного просмотра диапазона инсоляции.

Полученная функциональная зависимость используется в качестве справочной таблицы при управлении режимами СФЭУ средствами микроконтроллера Arduino Nano.

Разработанная система управления может быть использована не только в рамках симулятора, но и в качестве контроллера реальных СФЭУ. При этом логика управления имеет вид:

1. Измерение солнечной инсоляции и передача ее значения в микроконтроллер;
2. На основании данных справочной таблицы подстройка синусоидального модулирующего сигнала ШИМ для получения максимальной мощности СФЭУ.

Апробация симулятора. Для отладки предложенной математической модели симулятора рассмотрена СФЭУ на электростанции в Асуане (Комомбо). Параметры анализируемого объекта и характеристики режимов ее работы приведены в диссертационной работе. На рис. 8 представлена полученная в процессе моделирования P - V кривая максимальной мощности. Данная функциональная зависимость практически полностью совпадает с промышленным аналогом.

Результаты моделирования работы СФЭУ. Симулятор позволяет получать не только ТММ, но и все интересующие эксплуатационный персонал электрические характеристики, в том числе несинусоидальные искажения и уровень гармонических составляющих в токах и напряжениях. На рисунках 9 и 10 показано полученное в процессе моделирования выходное напряжение и гармонические составляющие напряжения конвертора до и после фильтра при работе СФЭУ в режиме изолированной работы. Величина гармонических составляющих на выходе конвертора составляет примерно 22 %. Использование LCL фильтра (с параметрами, полученными на основе моделирования) позволяет снизить коэффициент гармонических составляющих до 4.9%, что соответствует требованиям IEEE (5%). Наряду с пятой гармоникой на выходе конвертора заметно проявляется 11-я и 17-я гармоники (рисунок 9). На выходе фильтра гармоники кратностью выше 5 практически отсутствует (рисунок 10).

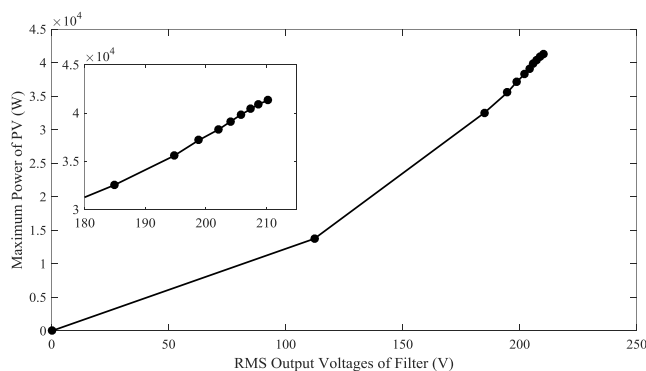


Рисунок 8 — Характеристика максимальной мощности конвертора

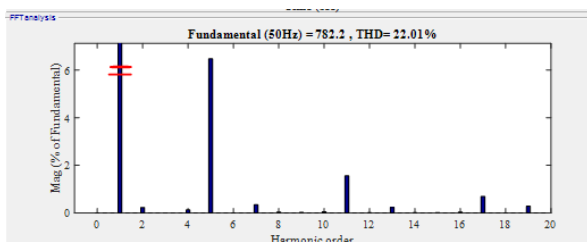


Рисунок 9 – Гармонические составляющие на выходе конвертора при изолированной работе СФЭУ

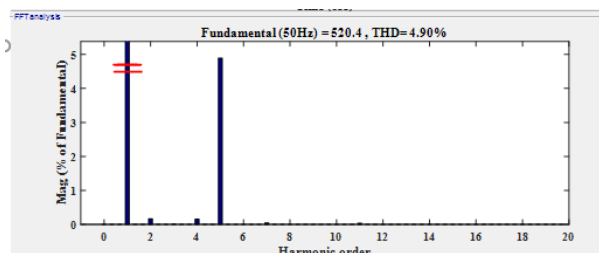


Рисунок 10 – Гармонические составляющие на выходе фильтра при изолированной работе СФЭУ

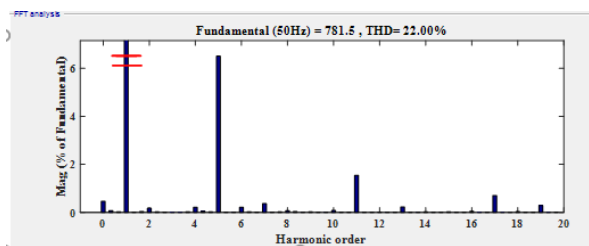


Рисунок 11 – Гармонические составляющие на выходе конвертора. Режим параллельной с ОРЭС работы

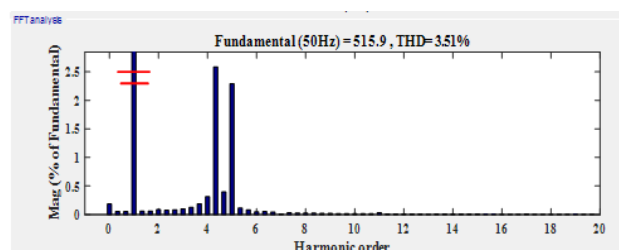


Рисунок 12 – Гармонические составляющие на выходе фильтра. Режим параллельной с ОРЭС работы

При работе СФЭУ параллельно с основной сетью на выходе фильтра заметно наличие субгармонических составляющих (рисунки 11 и 12). Однако их процентное содержание незначительно, и практически их можно не принимать во внимание. Использование LCL-фильтра позволяет снизить коэффициент гармонических составляющих до 3,51%, что соответствует требованиям стандарта IEEE.

Сопоставление реальных и расчетных данных показывает, что моделирующая система имеет относительно небольшую погрешность, приемлемую для того, чтобы рекомендовать систему управления на базе микроконтроллера Arduino Nano.

Эквивалентирование СФЭУ при КЗ. С целью определения переходных и сверхпереходных сопротивлений для расчетов токов КЗ при моделировании СФЭУ в виде ЭДС и сопротивления было выполнено моделирование динамического процесса при КЗ за фильтром.

В таблице 2 представлены полученные в результате моделирования значения ЭДС, токов и реактивных сопротивлений x_d, x'_d, x''_d . Соответствующая амплитудному значению доаварийного тока апериодическая составляющая тока КЗ может быть определена по формуле: $i_a(t) = (I'' - I') \exp(-t / 0,02) + I'$, где I'' – действующее значение тока КЗ в начальный момент времени. Постоянная времени апериодической составляющей определяется параметрами как PV-панели, так и конвертора. Величина I'' лимитируется уставками системы защиты конвертора.

Таблица 2 – Динамические параметры СФЭУ

$E(V)$	$I(A)$	$I'(A)$	$I''(A)$	$x(Ohm)$	$x'(Ohm)$	$x''(Ohm)$
205	852	1250	1735	0,24	0,164	0,12

Глава 3. В главе представлен анализ связанных с КЗ переходных процессов гибридных ЛЭЭС, имеющих в своем составе подсистемы как постоянном и переменном токе. При этом объекты РГ, а также системы аккумулирования электроэнергии могут быть подключены в различных точках распределительной сети каждой из подсистем. Большая часть электроэнергии от источников генерации на постоянном токе преобразуется для электропотребления на переменном токе. Связь сетей постоянного и переменного тока осуществляется через конверторы DC/DC, DC/AC и AC/DC (рисунки 13 и 14). Наличие нагрузки постоянного тока позволяет снизить мощность преобразовательных устройств DC/AC, что приводит не только к экономии затрат, но и к снижению токов КЗ в сети переменного тока. В то же время появление новой подсистемы требует анализа режимов сети постоянного тока, в том числе и анализа переходных процессов при появлении и отключении КЗ. Для передачи энергии на постоянном токе, используются двухполюсные связи (плюс-минус). При этом нагрузка подключается между полюсом и землей или между полюсами. Использование распределительных сетей постоянного тока может повысить эффективность

системы передачи и потребления электроэнергии. Концепция использования распределительных сетей постоянного тока, представляет собой одно из возможных направлений развития электроэнергетических систем.

Описание системы. Для анализа электрических режимов гибридных ЛЭСС рассматривалась ЛЭЭС в составе: ВЭУ мощностью 1,5 МВА, 575 В и СЭС мощностью 100 кВт. Система аккумулирования энергии подключается (в зависимости от схемы) к шинам переменного (рисунок 13) или постоянного (рисунок 14) тока. Номинальные характеристики DC/AC конвертора различны для ЛЭЭС на постоянном и переменном токе и определяются номинальными характеристиками как ИП, так и характеристиками распределительной сети. Нагрузка в ЛЭЭС может быть подключена как сети переменного (рисунок 13), так и постоянного (рисунок 14) тока. Между подсистемами постоянного и переменного токов установлен межсистемный инвертор, который передает энергию в направлении DC/AC. В обратном направлении энергия не передается. При передаче энергии данный инвертер в зависимости от стадии переходного процесса моделируется сопротивлениями x'' , x' , x . Аккумуляторная батарея моделируется по аналогии с PV- установкой, как источник питания с инвертором.

Моделирование режимов работы гибридной ЛЭЭС. Моделирование различных режимов работы ЛЭЭС выполнялось с целью исследования переходных процессов в ЛЭЭС в подсистемах постоянного и переменного токах. В точке подключения ЛЭЭС к основной распределительной сети (см. рисунки 13 и 14) моделировалось трехфазное КЗ в момент времени $t = 3$ с, продолжительностью 0,2 с. Скорость ветра и солнечная инсоляция при этом составляли 12 м/с и 1000 Вт/м² соответственно (максимальные величины). На рисунках 15 и 16 представлены графики изменения токов ОРЭС и ЛЭЭС на переменном токе, и ОРЭС и ЛЭЭС на постоянном токе соответственно.

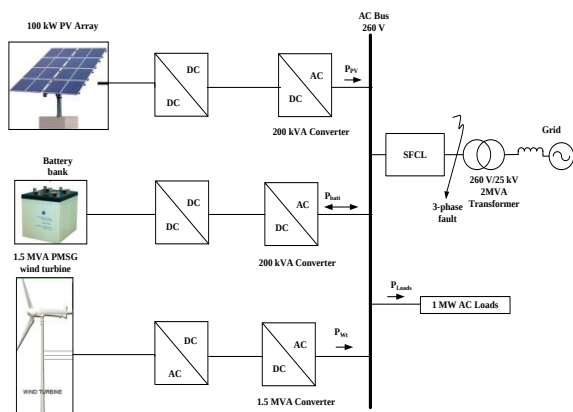


Рисунок 13 – Конфигурация подсистемы переменного тока

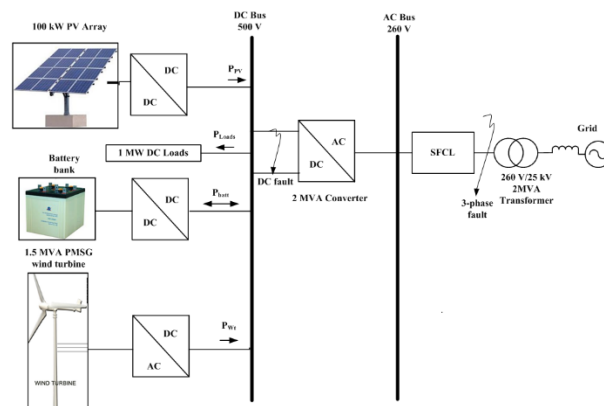


Рисунок 14 – Конфигурация подсистемы постоянного тока

При отсутствии ограничителя тока СОТ ток со стороны ОРЭС при КЗ достигает уровня 90 кА, в то время как со стороны ЛЭЭС – около 10 кА, а от сети постоянного тока – 5,2 кА. При наличии СОТ ток со стороны основной электрической сети снижается до уровня 35 кА, а со стороны ЛЭЭС до 1,5 кА. Если после отключения КЗ токи от ИП в сети переменного тока в течение короткого времени восстанавливаются до предаварийного уровня, то ток со стороны подсистемы постоянного тока продолжает оставаться значительным в течение около 3 с. (рисунок 1 Рисунок 5.б).

Представленные результаты показывают наличие значительных колебаний токов при КЗ в ЛЭЭС на переменном токе по сравнению с ЛЭЭС на постоянном токе. СОТ снижает

колебания токов, активной и реактивной (в случае ЛЭЭС на переменном токе) мощности ЛЭЭС как на постоянном, так и на переменном токе до значений в 20-30%. Следует отметить, что время восстановления до исходных параметров у ЛЭЭС на переменном токе 0,1 с, в то время как для ЛЭЭС на постоянном токе оно составляет 3 с.

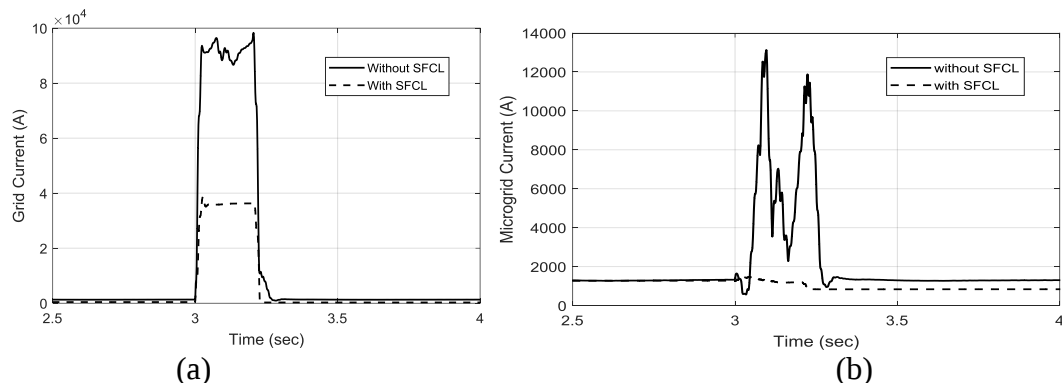


Рисунок 15 – График изменения (а) тока основной электрической сети и (б) ЛЭЭС на переменном токе при КЗ в сети переменного тока

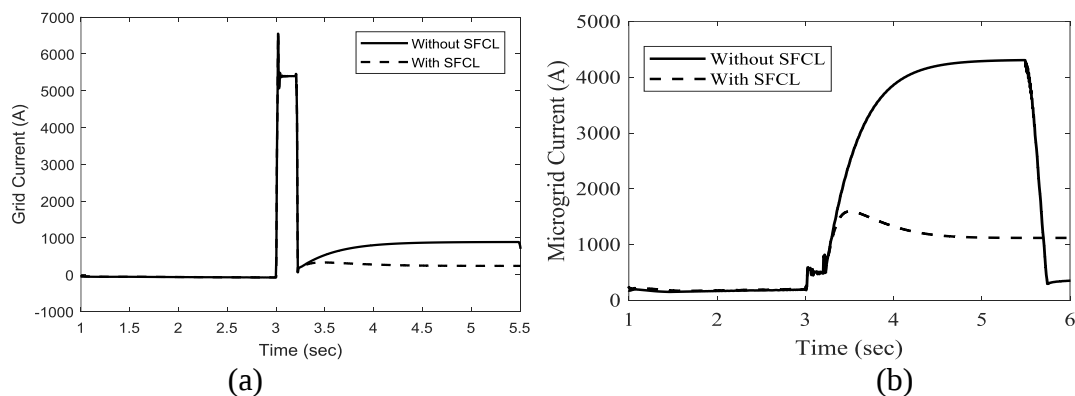


Рисунок 16 – График изменения (а) тока магистральной сети и (б) ЛЭЭС на постоянном токе при моделировании КЗ

Ток КЗ от ИП в сети постоянного тока. С целью анализа переходных процессов токов ИП в сети постоянного тока выполнено моделирование КЗ длительностью 0,2 с, происходящее в момент $t = 3$ с. На рисунке 17 показаны графики: (а) – тока PV-установки; (б) – тока аккумуляторной батареи; (с) – выпрямленного тока ветрогенератора; (д) – тока от подсистемы постоянного тока в сети переменного тока. Нетрудно видеть эффект работы токоограничивающих устройств (рисунки 17.а –17.д). Ток подсистемы постоянного тока в подсистеме переменного тока снижается по мере понижения напряжения в сети постоянного тока.

Поведение ИП в сети постоянного тока при КЗ в сети постоянного тока не отличается по существу от рассмотренных выше. Отличие – лишь в величине суммарного тока КЗ. При этом следует отметить, как правило, одностороннее действие межсистемного инвертора. Двухсторонние межсистемные инверторы работают как два, включенных в параллель односторонних инвертора. Кроме того, в системе постоянного тока токи КЗ имеют гораздо более высокие скорости нарастания по сравнению с системами переменного тока из-за конденсаторов в системе конверторов, которые обычно разряжаются через кабели с относительно низкими значениями полного сопротивления.

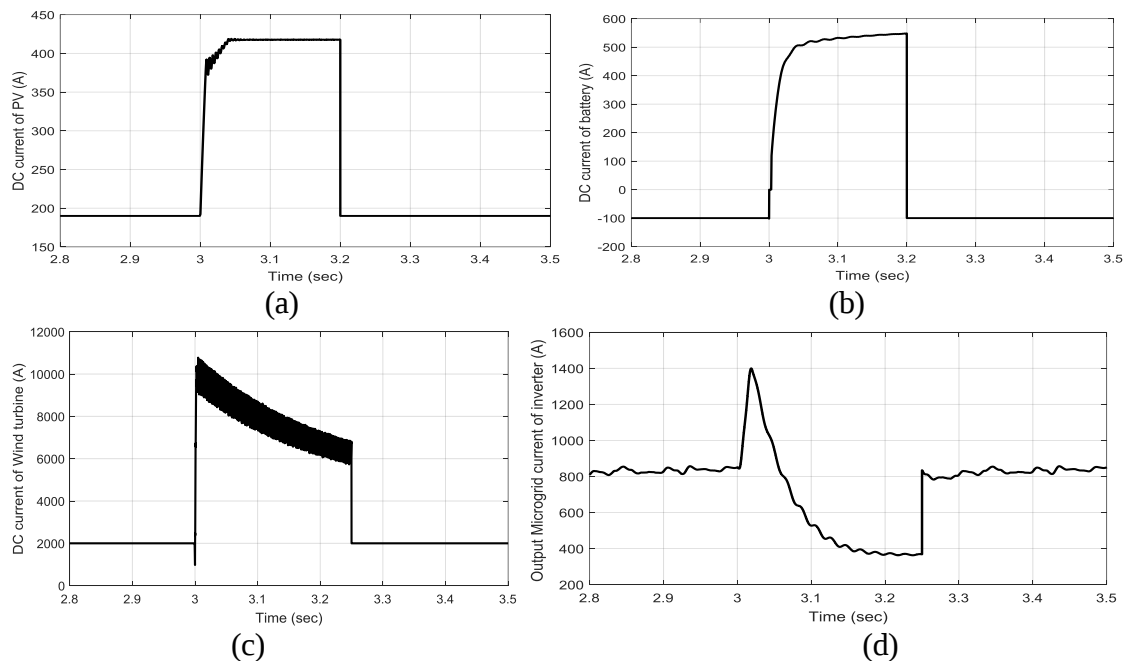


Рисунок 17 – (а) ток PV-установки; (б) – ток аккумуляторной батареи; (с) – выпрямленный ток ветрогенератора; (д) –ток от подсистемы постоянного тока в сети переменного тока

Глава 4. Представлен анализ влияния системы контроля частоты ветрогенераторов с конверторами на токи КЗ. Рассматривается специфика расчетов нормальных режимов и токов КЗ в ЛЭЭС с РГ на ВИЭ. Отмечается, что наиболее значимым фактором здесь является учет системы управления ИП с конвертором. Предложена математическая модель ИП с конвертором при анализе токов КЗ. Выполнены тестовые расчеты токов КЗ. С целью анализа надежности послеаварийных структур выполнены тестовые расчеты режимной надежности ЛЭЭС.

Расчет установившихся режимов ЛЭЭС, работающей параллельно с основной системой. В отличие от РГ на базе традиционных генерирующих установок, выходные характеристики РГ в составе которых имеются конверторы, при расчете установившихся режимов (УР) главным образом определяются блоком регулирования по частоте и отличаются в зависимости от модели и мощности РГ. При использовании ИП в режиме постоянной мощности (мощность установки при заданной скорости ветра или неизменном уровне солнечной радиации) РГ представляется PQ –моделью. При доминирующей системе регулирования напряжения РГ представляется PV - моделью с переходом на PQ –модель при ограничении реактивной мощности. В расчетах УР, как правило, используется метод последовательных приближений (back/forward sweep method) и метод Ньютона.

Перетоки мощности в ЛЭЭС, работающей в изолированном режиме. Расчет перетоков мощности в ЛЭЭС, работающей в изолированном режиме (где трудно определить балансирующий узел бесконечной мощности) отличается от расчета режима ЛЭЭС работающей параллельно с основной системой (где балансирующим узлом является узел связи с основной электрической сетью). В рассматриваемом случае на первый план выходит задача обеспечения баланса мощности с возможностью частичного ограничения электропотребления. При избытке мощности регуляторы частоты генерирующих устройств воздействуют на аппарат регулирования мощности (угол лопастей ветряной турбины или напряжение смещения для солнечных батарей). При дефиците мощности в ЛЭЭС устройства РГ работают в режиме максимально возможной мощности, а регулирование по частоте осуществляется автоматикой частотной разгрузки (АЧР) путем ограничения

электропотребления пропорционально номинальной мощности электроприемников. Предпочтительным методом расчета установившегося режима являются интервальный метод Ньютона (Newton-Trust region method), а также менее чувствительный к (актуальной для изолированных ЛЭЭС) проблеме сингулярности матрицы Якоби метод Левенберга-Маквардта (Levenberg-Marquardt).

Расчет токов КЗ. Наиболее значимым фактором при расчете токов КЗ является ограничение выходного тока конвертора системой управления ИП. Предельный ток конвертора, как правило определяется номинальными параметрами полупроводниковых элементов и не превышает двукратного значения номинального тока. Работа конвертора при снижении напряжения определяется системой управления, при этом вольт-амперная характеристика регулятора нелинейна, что требует учета при расчете токов КЗ.

Метод эквивалентных сопротивлений. Индивидуальные токи ИП при КЗ в ЛЭЭС (токи подпитки) достаточно велики. При этом блок управления конвертором ограничивает величину тока ИП до 2 о.е. При расчете токов КЗ ИП представляется переменным виртуальным сопротивлением, которое, в том числе, может учитывать заданное ограничение тока. При этом в процессе расчета величина сопротивления меняется в зависимости от момента времени и напряжения на выходе конвертора. Для учета данного фактора в методе виртуальных сопротивлений предлагается следующий алгоритм:

1. Каждый конвертор представляется малым эквивалентным сопротивлением;
2. Соотношение R/X конвертора предполагается равным R/X внешней цепи;
3. Для трехфазного КЗ, в рассматриваемой точке ЛЭЭС рассчитываются токи подпитки от каждого ИП с конвертором;
4. При превышении тока подпитки двукратного номинального тока конвертора выполняется коррекция эквивалентного сопротивления ИП.
5. Расчет продолжается с п.3 вплоть до последней коррекции тока ИП с конвертором.

Второй метод учета кусочно-нелинейной зависимости тока ИП с конвертором:

1. Расчет установившегося режима, предшествующего моменту возникновения КЗ (рисунок 18).
2. Используя данные полученные на этапе А выполняется расчет токов КЗ и остаточных напряжений в узлах схемы согласно алгоритму:
 - а) Известными математическими методами выполняется расчет матрицы узловых сопротивлений $Z_{bus} = Y^{-1}$, диагональный элемент Z_{ff} которой определяет эквивалентное сопротивление электрической схемы относительно узла f , в котором имеет место КЗ. При этом ток КЗ $I_f = V_f / Z_{ff}$, где V_f – напряжение узла f в доаварийном режиме.
 - б) Изменения напряжений в узлах электрической сети при КЗ определяется соотношением:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ -V_f \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1n} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -I_f \\ 0 \end{bmatrix}.$$

В результате могут быть определены остаточные напряжения $[V_i]$ и токи $[I_{ij}]$ по связям.

- с) Выполняется анализ токов КЗ от каждого ИП. В зависимости от напряжения узла возможны три случая для расчета тока подпитки от ИП.

$$\begin{cases} V_i \geq 0.9, & I_{i,d} = P_i / V_i; & I_{i,q} = Q_i / V_i, \\ 0.4 < V_i < 0.9, & I_{i,d} = P_i / V_i; & I_{i,q} = k(1 - V_i)I_i, \\ V_i \leq 0.4, & I_{i,d} = 0; & I_{i,q} = I_{max}, \end{cases}$$

где: k – коэффициент подстройки реактивного тока от ИП с конвертором (принимается равным 2). При этом если $I_{i,d}^2 + I_{i,q}^2 > (I_{i,max})^2$, то $|I_i| = I_{i,max}$, $\theta = \tan^{-1} \frac{I_{i,q}}{I_{i,d}}$. Результирующий ток ИП: $I_i = I_{i,d} + jI_{i,q}$.

- д) Изменение токов ИП приводит к изменению суммарного тока КЗ, $I_f = \sum_k^N I_k$. Расчет повторяется, начиная с п.2 до тех пор, пока изменяются токи ИП.

Интегральный индекс опасности (ИИО). В результате КЗ возможно деление ЛЭЭС на совокупность изолированных и работающую параллельно с основной распределительной системой подсистем. В частности, при КЗ в узле 3 (рисунок 18), релейная защита отключает узел 3 и делит систему на 3 части, представленные на рисунке 19. При этом распределение нагрузки и генерации по изолированным подсистемам оказывается неравномерным – в некоторых подсистемах возможен дефицит мощности, что приводит к необходимости ограничения электропотребления. С целью определения значимости данного фактора для Египта по существующим методикам был выполнен расчет режимной надежности (РН) ЛЭЭС с РГ на ВИЭ.

В качестве основного показателя РН рассматривался показатель ИИО R , который в данной работе включает составные показатели риска: ограничения нагрузки $R(\Delta L|r_j)$, отклонения напряжений в узлах от нормативных $R(V|r_j)$ и отклонения частоты от допустимого значения $R(f|r_j)$ при событии r_j . Результирующий показатель представлен в виде линейной комбинации:

$$R(r_j) = \alpha_L R(\Delta L|r_j) + \alpha_V R(\Delta V|r_j) + \alpha_f R(\Delta f|r_j) = \\ = \alpha_L P_r(r_j) S_{sev}(L|r_j) + \alpha_V P_r(r_j) S_{sev}(V|r_j) + \alpha_f P_r(r_j) S_{sev}(f|r_j),$$

где: $S_{sev}(L|r_j)$, $S_{sev}(V|r_j)$ и $S_{sev}(f|r_j)$ оценка опасности (например, относительная глубина) ограничения нагрузки, отклонения напряжения и частоты от номинальных значений при отказе r_j , соответственно; α_L , α_V и α_f – заданные в качестве исходных данных, соответствующие им веса, $P_r(r_j)$ вероятность возникновения j -й компоненты безопасности. В качестве базового принимался «критерий N-1» – отключение всех элементов ЛЭЭС, по одному, в том числе и узлов электрической сети, вызванное устойчивым КЗ в них. Вероятности отказа элементов задавались в качестве исходных данных.

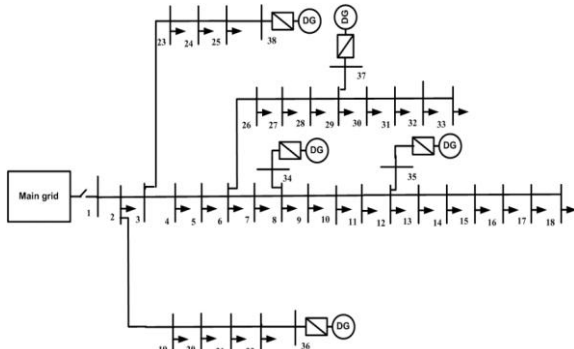


Рисунок 18 – Тестовая схема IEEE 33 с 5 РГ

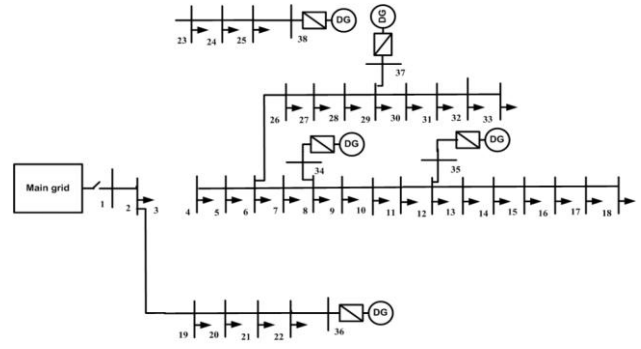


Рисунок 19 – Подсистемы, образуемые при КЗ в узле 3 и срабатывании релейной защиты

Стратегия ограничения нагрузки. Для определения величины ограничения нагрузки производится сравнение совокупной мощности ИП P_{DGZ} , с совокупным спросом P_{LZ} . При этом если: $P_{DGZ} \geq P_{LZ}(1 + \sigma)$ и $P_{DGZ} \leq P_{DGZmax}$ ограничение нагрузки отсутствует. Ограничение нагрузки P_{Lsh} выполняется при $P_{DGZ} < P_{LZ}(1 + \sigma)$: $P_{Lsh} = P_{LZ} - P_{DGZ}/(1 + \sigma)$,

где: P_{DGZ}, P_{LZ} – соответственно располагаемая мощность ИП и мощность нагрузки системы (или подсистемы).

Тестовые расчеты.

Трехфазное КЗ. В рамках данного диссертационного исследования выполнен расчет токов КЗ для схемы ЛЭЭС, с номинальным напряжением 12.6 кВ (см. Рисунок 18). ИП с

конверторами подключены к узлам 8, 12, 22, 25 и 29. Расчет тока КЗ выполнялся с использованием метода виртуального сопротивления и предлагаемого метода при работе ЛЭЭС параллельно с основной ЭЭС и изолированно от нее. Сценарии расположения РГ в системе представлены в таблице 3.

При КЗ ИП стандартно моделировались реактивными сопротивлениями x'' ; x' ; x в зависимости от момента наблюдения переходного режима. Их значения зависят от мощности конвертора. В таблице 4 приведены полученные в результате моделирования значения сверхпереходного, переходного и нормального реактивного сопротивлений ВЭУ с генератором СГПМ и различной мощностью преобразователя. В таблице 5 показаны вычисленные значения реактивных сопротивлений x'' ; x' ; x соответственно ВЭУ PV-установки. Полученные в результате моделирования величины мало отличаются от справочных.

Таблица 3 – Четыре сценария расположения РГ в системе IEEE 33

№ узла	Номер узла к которому подключен ИП			
	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	Сценарий 4
34	8	1	1	3
35	9	18	8	12
36	12	22	9	21
37	18	25	14	24
38	24	33	18	29

На рисунке 18 представлены результаты расчета токов при КЗ в узле 8. В качестве тестового сценария выполнялись расчет при трехфазном КЗ на землю в узле № 8 (рисунок 18). Расчеты выполнялись с использованием метода виртуальных сопротивлений и предлагаемого метода. В таблице 6 представлены результаты расчета тока КЗ для четырех сценариев размещения РГ при параллельном с основной распределительной сетью (первая цифра) и изолированном (вторая цифра) режимах работы ЛЭЭС. Как и следовало ожидать, суммарный ток КЗ в первом случае больше.

Таблица 4 – Сверхпереходное, переходное и нормальное реактивные сопротивления ВЭУ с генератором СГПМ при различной мощности конвертора

P (МВт)	E(В)	I(A)	I'(A)	I''(A)	x (Ом)	x' (Ом)	x''(Ом)
1,5	500	1470	3552	4671	0,34	0,14	0,11
1	500	945	1247	1980	0,53	0,4	0,25
0,8	500	850	1208	1939	0,59	0,41	0,26
0,425	500	462	1133	1541	1,1	0,44	0,32
0,1	500	184	1100	1270	2,7	0,45	0,39

Таблица 5 – Сверхпереходное, переходное и нормальное реактивные сопротивления PV-установки при различной мощности конвертора

P (кВт)	E(В)	I(A)	I'(A)	I''(A)	x (Ом)	x' (Ом)	x''(Ом)
250	205	852	1250	1735	0.24	0.164	0.12
200	205	708	1243	1621	0.29	0.165	0.126
150	205	510	1240	1503	0.4	0.165	0.136
100	205	348	1234	1421	0.59	0.166	0.144
50	205	190	1211	1336	1.1	0.17	0.153

В таблице 7 представлены результаты расчета токов подпитки от ИП при КЗ для рассматриваемых методов. Можно видеть, что при учете системы ограничения тока ток ИП находится в пределах допустимого значения 2 о.е. При фиксированных (виртуальных) сопротивлениях ИП данные ограничения не учитываются. По этой причине значения токов

КЗ, полученные предлагаемым методом меньше в среднем на 30% по сравнению с методом виртуальных сопротивлений. Поскольку подпитка КЗ от ИП зависит от места КЗ и ИП, отличие токов ИП для разных сценариев не одинаково. На рисунке 20 показаны значения токов КЗ для всех узлов системы. Нетрудно видеть насколько сильно могут отличаться результаты в зависимости от метода расчета.

Таблица 6 – Результаты расчета токов при КЗ в узле 8

Ток КЗ	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	Сценарий 4
Метод с использованием виртуального сопротивления (о,е)	72,9/45,9	47,7/42,6	70/46,4	52,9/43,1
Предлагаемый метод (о,е)	42,8/23	32,6/22,7	40,8/23,2	42,5/23

Таблица 7 – Токи подпитки от РГ при КЗ

№ узла	Сценарий 1		Сценарий 2		Сценарий 3		Сценарий 4	
	Метод вирт. сопр.	Предл. метод	Метод вирт. сопр.	Предл. метод	Метод вирт. сопр.	Предл. метод	Метод вирт. сопр.	Предл. метод
34	13,5	2,0	3,1	0,02	3,8	0,37	3,98	0,56
35	10,93	1,80	7,07	1,19	13,55	2,0	10,92	1,77
36	8,93	1,39	2,50	0,11	11,17	1,84	2,64	0,11
37	6,16	0,95	3,97	0,61	7,64	1,22	4,09	0,61
38	5,08	0,74	7,06	1,22	5,52	0,78	8,51	1,47

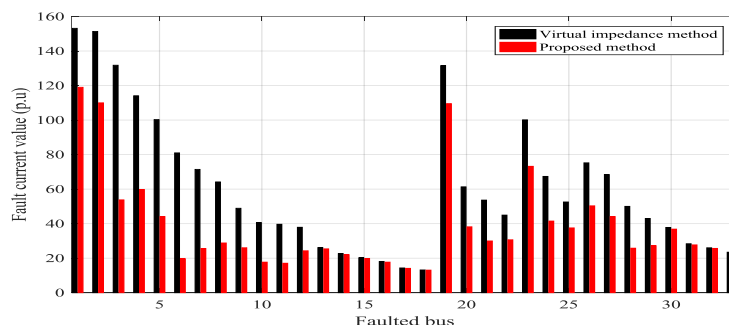


Рисунок 20 – Значения токов КЗ при различных местах возникновения КЗ

Результаты анализа ИИО. Расчеты режимов ЭЭС при моделировании отключений элементов в ЛЭЭС выполнялись с помощью ПК MATLAB. ИИО и величина ограничения нагрузки определены согласно выражениям, представленным выше. Значения констант в уравнениях приняты равными: $\alpha_L = \alpha_V = \alpha_f = 0,005$, $P_r(r_j) = 1/33$, $V_{max} = 1,05$, $V_{min} = 0,95$, $f_{max} = 1,05$ и $f_{min} = 0,95$. Коэффициент общего ограничения нагрузки определен по итогам расчета установившегося режима системы; $\sigma = P_{netlosses}/P_{gnet}$, где $P_{netlosses}$ – общее ограничение нагрузки в системе, P_{gnet} – совокупная генерация в системе. В таблице 8 показаны расчетные показатели надежности при параллельной (первая цифра) и изолированной (вторая цифра) режимах работы ЛЭЭС при КЗ узлах (2; 3; 4; 6; 7; 8; 12 и 13). Расчеты при параллельной с основной сетью и изолированной работе ЛЭЭС отличаются лишь тем, что при делении системы на подсистемы во втором случае число изолированных подсистем на 1 меньше. Отсюда надежность системы в целом при параллельной работе выше.

Таблица 8 – Значения ИИО и ограничения нагрузки

Узел КЗ	R до ограничения нагрузки, %	R после ограничения нагрузки, %	Ограничение нагрузки (кВт)
2	0,05 / 0,046	0,049	100/ 100
3	0,12/ 0,125	0,024	530/ 530
4	0,03/ 0,321	0,025	120/ 430
6	0,05/ 0,369	0,024	60/ 740
7	0,026/ 0,027	0,025	200/ 993.1
8	0,05/ 0,052	0,049	200/ 1190
12	0,196/ 0,194	0,194	510/ 510
13	0,148/ 0,146	0,146	450/ 450

В режиме параллельной работы ЛЭЭС при КЗ в узле 3 в подсистеме с узлами 23, 24, 25 и 38 активная нагрузка больше располагаемой генерации в узле 38. Это потребовало частичного ограничения электропотребления в подсистеме. Значение ИИО выше при КЗ в узлах расположенных ближе к точке подключения к основной ЭЭС (в частности в узлах 2,12 и 13). При КЗ в узлах 12-18 ввиду отсутствия генерации при выделении подсистемы требуется полное отключение нагрузки. Величина ограничения нагрузки определялась на основании расчета установившегося режима с учетом ограничения нагрузки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Рассмотрены основные направления развития электроэнергетики Египта. Наиболее перспективным признано развитие системы генерации на ВИЭ с использованием энергии ветра и солнца путем сооружения ветряных и солнечных электростанций относительно большой мощности и распределенной генерации для обеспечения электроэнергией потребителей удаленных провинций.
2. Выполнен анализ влияния отдельных подсистем системы управления наиболее распространенного в Египте ветрогенератора с генератором СГПМ и конвертором на нормальные и аварийные режимы (в том числе режимы КЗ) работы локальных ЭЭС. Показано, что наибольшее влияние на величину токов КЗ оказывают: системы управления конвертором, в которых используются PI-регуляторы с каскадными контурами управления, где внешние контуры управления предназначены для регулирования напряжения постоянного тока и реактивной мощности, а внутренние контуры управления – для регулирования тока со стороны сети; устройство защиты от превышения допустимой частоты вращения ротора генератора ВЭУ; система поддержания генераторного режима работы при просадке напряжения с функцией сохранять генераторный режим ВЭУ при кратковременном снижении напряжения во внешней цепи и ограничитель тока СОТ. Показана необходимость дифференциального учета системы регулирования: регулирование частоты вращения турбины ВЭУ; регулирование тока ВЭУ; обеспечение режима СТАТКОМа.
3. Разработаны принципы и структуры моделирования в системе ПО MATLAB/ Simulink (симулятор РГ на ВИЭ) нормальных и аварийных режимов работы источников РГ с конверторами в ЛЭЭС при изолированной и параллельной работе ЛЭЭС с основной распределительной сетью. Симулятор позволил: выявить основные закономерности поведения ИП с конверторами не только в аварийных, но и послеаварийных режимах; оценить обобщенные параметры ИП с конверторами для расчета токов КЗ в сетях переменного и постоянного токов; получить необходимые для анализа электрических режимов $P-V$ и $I-V$ характеристики ИП. Для симулятора разработан ряд сервисных программ. Симулятор апробирован при моделировании СФЭУ на электростанции в Асуане (Комомбо).

4. Показано, что основной функциональной характеристикой СФЭУ, учет которой необходим при анализе как нормальных, так и аварийных (в том числе при КЗ) режимов является траектория максимальной мощности, построенная на множестве вольт-амперных характеристик СФЭУ. С целью симуляции системы управления СФЭУ при проектировании и обучении впервые (согласно библиографическому анализу) предложено использование микроконтроллера Arduino Nano 3х. Для согласования микроконтроллера с симулятором разработан программно-аппаратный вычислительный комплекс.
5. На основе моделирования симулятором нормальных и аварийных режимов ИП с конверторами сделан вывод о необходимости установки LCL – фильтров, настроенных на компенсацию 11 и 5 гармонических составляющих.
6. Рассмотрена специфика расчета токов КЗ в гибридных ЭЭС. Показано, что существенное влияние на величину токов КЗ оказывает учет специфических свойств межсистемного конвертора.
7. Показано, что наиболее значимым фактором при расчете токов КЗ является ограничение системой управления ИП выходного тока конвертора. Для учета данного фактора предложено представлять ИП с конверторами трехступенчатой вольт-амперной характеристикой. На базе трехступенчатой модели разработан математический метод расчета токов КЗ. Метод апробирован на тестовой схеме IEEE-33. На основе тестовых расчетов сделан вывод о существенной погрешности существующего метода расчета токов КЗ, основанного на методе эквивалентных сопротивлений.
8. По заданию Комитета по энергетике Египта на базе существующих методов расчета показателей надежности распределительных систем разработана методика расчета по критерию «N-1» показателей режимной надежности ЛЭЭС с учетом управляющих воздействий по отклонениям напряжений и частоты. В качестве основного показателя надежности был принят интегральный индекс опасности. С этой целью разработана программа и выполнены тестовые расчеты. Расчеты показали необходимость учета критериев «N-k» более высокого порядка, $k > 1$. Сделан вывод о необходимости дальнейшего исследования в области режимной надежности.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:

1. **Ареф М.**, Обоскалов В.П., Удинцев В.Н. Цифровое управление трехфазным инвертором для солнечных батарей // Промэнергетика. 2018. С.50-58; 0.45 п.л / 0.15 п.л.
2. **Aref, M.**, Oboskalov, V., Mahnitko, A., Varfolomejeva, R. Protection design scheme of grid connected PMSG wind turbine // 58th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2017 – Proceedings 2017-November. С. 1-6; 0.47 п.л / 0.16 п.л. (Scopus, WoS).
3. **Aref M.**, Meneam, A., Oboskalov, V., Mahnitko, A., Transient analysis of AC and DC microgrid with effective of SFCL // 018 IEEE 59th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2018 - Proceedings 8659839. С.1-6; 0.51 п.л. / 0.17 п.л. (Scopus, WoS).
4. **Aref, M.**, Ahmed, I., Oboskalov, V., Mahnitko, A., Microcontroller look-up table of digital control MPPT of PV system // 018 IEEE 59th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2018 - Proceedings 8659900. С. 1-5; 0.42 п.л/0.14 п.л. (Scopus, WoS).

В других изданиях:

5. **Aref M.**, Oboskalov V. P. Steady-state and dynamic performance of large scale fixed speed wind farms connected to an electric grid as influenced by grid strength. // IV Российская

молодежная научная школа-конференция «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи»: сборник трудов. Томск: ТПУ, 2016. Т.1. С.196-199; 0.28 п.л / 0.13 п.л.

6. **Aref M.**, Oboskalov V. P. Modeling and analysis of grid connected PMSG wind turbine for steady state and transient behavior of in different fault time // IV Российская молодежная научная школа-конференция «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи»: сборник трудов. Томск: ТПУ, 2016. Т.1. С.188-191; 0.24 п.л. / 0.12 п.л.

7. Ahmed I., **Aref M.**, Oboskalov V. P. Modelling and simulation MPPT of PV system with three-phase three-level converter. // IV Российская молодежная научная школа-конференция «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи»: сборник трудов. Томск: ТПУ, 2016. Т.1. С.192-195; 0.2 п.л. / 0.07 п.л.

8. **Ареф М.**, Обоскалов В.П. Схема защиты ветряного PMSG генератора, работающего на централизованную электрическую сеть // 6-я Международная научно-практическая конференция «Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии - ЭКСИЭ-06»: сборник трудов. Екатеринбург, 2017. С. 246-250; 0.24 п.л. / 0.12 п.л.