

УДК 621.311

ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ МИКРОСЕТЕЙ ПЕРЕМЕННОГО И ПЕРЕМЕННО-ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БАЗЕ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ПАССИВНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

АВТОРЫ:

П.В. Илюшин,
д.т.н., Институт энергетических исследований Российской академии наук

В.С. Вольный,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Процесс создания микросетей на базе существующей пассивной распределительной сети требует проведения многокритериального анализа. Он включает, помимо расчета инвестиций в модернизацию распределительной сети, оценку технико-экономических эффектов от создания микросетей. Получаемые эффекты зависят от топологии и конфигурации распределительной сети, особенностей микросетей, выбора вида тока для всей микросети или отдельных ее частей, способов подключения распределенных источников энергии, наличия и состояния информационно-коммуникационной инфраструктуры и других факторов. Полные исходные данные позволяют разработать оптимальную конфигурацию микросетей, однако основные технико-экономические эффекты определяются алгоритмами работы и параметрами настройки системы автоматического управления (САУ) и системы защиты. Известные подходы к созданию микросетей сосредоточены на решении основных задач при минимизации инвестиций в их реализацию. Это полностью оправдано при новом строительстве микросетей, однако создание микросетей на базе существующей распределительной сети с учетом уникальности топологии и конфигурации не позволяет использовать унифицированные решения. Разработка подходов к созданию микросетей при наличии указанных ограничений, с минимизацией инвестиций в модернизацию существующей распределительной сети, является актуальной задачей. Применение различных видов тока для фрагментов микросети определяет выбор САУ и системы защиты, зависящий от наличия информационно-коммуникационной инфраструктуры. В статье приведен обзор подходов к созданию микросетей переменного и переменного-постоянного тока для получения максимальных технико-экономических эффектов, а также обзор методик анализа существующей распределительной сети для выбора вида тока для всей микросети или отдельных ее частей, оптимальных точек подключения микросетей к распределительной сети, структуры и мощности распределенных источников энергии с учетом информации о состоянии коммутационных аппаратов и информационно-коммуникационной инфраструктуры. Представлены результаты анализа подходов к выбору оптимальной конфигурации микросетей, САУ микросетей и системы защиты с оценкой технико-экономических эффектов при минимизации инвестиций в модернизацию существующей распределительной сети.

Ключевые слова:

#микросеть; #распределительная сеть; #распределенные источники энергии; #система автоматического управления; #система защиты; #информационно-коммуникационная инфраструктура; #силовая электронная преобразователь.

Современные тренды развития энергетики направлены на децентрализацию и декарбонизацию генерирующих мощностей и создание гибридных энергетических комплексов [1]. Это содействует преобразованию пассивных распределительных сетей в активные посредством интеграции в них большого количества распределенных источников энергии (РИЭ). Активные распределительные сети при этом участвуют в управлении режимами энергосистем, содействуя повышению надежности электроснабжения потребителей за счет приближения РИЭ к электроприемникам [2].

В состав распределенных энергетических ресурсов (РЭР), помимо РИЭ, входит управляемая нагрузка. К РИЭ относится генерация на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) — ветровые, солнечные электростанции и др., топливная генерация — газотурбинные установки, газопоршневые установки, дизель-генераторные установки, микротурбины и др., а также системы накопления электроэнергии (СНЭЭ) и топливные элементы (ТЭ) [3].

Создание активных распределительных сетей требует совершенствования как технологий производства и хранения электроэнергии, так и информационно-коммуникационной инфраструктуры (ИКИ) [4]. Однако интеграция РИЭ имеет ограничение как по количеству, так и по суммарной мощности. Это обусловлено тем, что рост объемов РИЭ требует на первом этапе усложнения алгоритмов управления в системах автоматического управления (САУ), на втором — применения более совершенных типов САУ и наличия ИКИ, соответствующей минимальным требованиям, на третьем — использования централизованных САУ на базе принципа «ведущий — ведомый». На третьем этапе необходимо наличие развитой ИКИ, соответствующей требованиям к надежности, пропускной способности и резервированию [5].

Наиболее перспективным способом создания активных распределительных сетей является интеграция в них не большого количества отдельных РИЭ, а масштабируемых систем электроснабжения — микросетей. Каждая микросеть имеет в своем составе разнородные РИЭ, в том числе гибридные энергетические комплексы, и группы взаимосвязанных потребителей, четко определенные электрические границы и функционирует как единый объект управления по отношению к распределительной сети. Микросеть может работать как в сетевом (параллельная работа с распределительной сетью), так и в островном режиме. Переход микросети из одного режима в другой и обратно реализуется статическим переключателем без нарушения электроснабжения потребителей [6]. Учет в микросети нестационарного характера генерации на основе ВИЭ и динамического характера спроса на электроэнергию позволяет обеспечить как устойчивость ее функционирования, так и устойчивость работы активной распределительной сети в целом [7].

Тиражированию проектов микросетей содействует развитие силовой электроники в части повышения основных параметров (номинальный ток, запирающее напряжение) силовых полупроводниковых приборов [8]. Это позволило создать различные типы силовых электронных преобразователей (СЭП) различных конфигураций и топологий [9]. Основным назначением СЭП является подключение разнородных РИЭ и управляемой нагрузки к микросети. Это позволяет создавать микросети различных типов — переменного тока, постоянного тока, а также переменного-постоянного тока (гибридные) [6].

Комплексное внедрение РИЭ, СЭП и ИКИ позволяет осуществить переход от пассивных распределительных сетей к активным с интеграцией в них различных типов микросетей. Это

также содействует преобразованию консьюмеров в просьюмеров, активно участвующих в управлении режимами микросети [10]. Качественное изменение роли конечных потребителей электроэнергии привело к появлению нового субъекта розничного рынка электроэнергии, заинтересованного в развитии технологий микросетей [11]. Однако создание микросетей приводит к возникновению трудностей с реализацией оптимального экономического регулирования консьюмеров/просьюмеров внутри микросети, между смежными микросетями, а также между микросетями и распределительной сетью [11].

Большое количество СЭП в составе микросети создает трудности с реализацией алгоритмов управления и защиты, что обусловлено малыми значениями (стремится к нулю) механических постоянных инерции (T) у РИЭ, а также наличием частей микросети, работающих на постоянном токе [12]. При этом меняется традиционное представление о структуре распределительных сетей из-за увеличения скорости протекания переходных процессов, а также из-за снижения уровня токов короткого замыкания (КЗ) [13].

В сети постоянного тока гибридной микросети требуется провести замену коммутационных аппаратов (автоматические выключатели, предохранители) и измерительных трансформаторов тока и напряжения. Кроме того, требуется использовать новые алгоритмы управления в САУ микросети и системы защиты, что обусловлено изменением регулировочных характеристик СЭП, контуров протекания тока КЗ и их величины. Поэтому создание микросетей на базе существующей распределительной сети сопровождается возникновением большого количества проблемных вопросов, требующих решения на этапе проектирования [14].

Подход к выбору конфигурации микросети может быть основан

на определении оптимального потока мощности (ОПМ) между микросетью и распределительной сетью, решении задачи поиска расписания (оптимальные графики выработки/потребления электроэнергии в микросети), а также планирования микросети (оптимальное количество, состав и мощность РИЭ, линий электропередачи, коммутационных аппаратов на перспективу, с учетом непредвиденных обстоятельств) [14].

В [15] предлагается определять ОПМ на основе оптимального управления разнородными РИЭ с использованием различных целевых функций, что является сложной оптимизационной задачей, требующей высокой точности решения. В [16] предложено использовать двухэтапную операционную модель, действующую на основе оценки рисков. На первом этапе просьюмеры планируют режим для максимизации своей прибыли от РИЭ и эти данные направляют оператору микросети. Оператор микросети формирует второй этап, на котором обеспечивает максимизацию общей прибыли с учетом стохастического характера выработки электроэнергии РИЭ на основе ВИЭ.

В [17] предложена двухэтапная модель, в которой на первом этапе минимизируются эксплуатационные затраты на генерацию и резервную мощность, а на втором оптимизируются затраты на изменение задания по генерации с учетом стохастического характера выработки электроэнергии РИЭ на основе ВИЭ с применением метода перетасовки прыжков лягушки. В [18] предложен подход к оптимальному планированию режимов работы микросети с разнородными РИЭ на основе метода реагирования на спрос при минимизации эксплуатационных затрат. В [19] рассматривается стохастическая модель планирования выработки электроэнергии РИЭ на основе ВИЭ с учетом неопределенности скорости ветра, солнечной радиации и рыноч-

ной цены на электроэнергию. Оптимизация реализуется на основе многокритериальной целевой функции, включающей рыночную прибыль, объемы выбросов CO₂ и среднюю величину недоотпуска электроэнергии. Для нахождения оптимального решения применяется многокритериальный алгоритм светлячка.

Рассмотренные выше подходы основаны на реализации экономических механизмов, но они не учитывают особенности и требования к управлению режимами работы микросетей. Многие опубликованные исследования нацелены на снижение эксплуатационных затрат в микросетях или максимизацию прибыли от функционирования РИЭ в составе микросетей [20].

Работа микросетей в условиях роста спроса на электроэнергию, увеличения доли генерации на основе ВИЭ, роста изношенности электросетевой инфраструктуры приводит к возникновению перегрузок линий электропередачи и силовых трансформаторов в распределительной сети [21]. Вопросы эксплуатации микросетей находят отражение в исследованиях, при этом применяются различные методы оптимизации с разными целевыми функциями [22]. Для обеспечения эксплуатационной гибкости при заданных показателях надежности электроснабжения алгоритмы, реализуемые в САУ микросетей, должны обладать адаптивностью к различным схемно-режимным ситуациям. Однако наличие большого количества разнородных РИЭ в микросетях и гибких алгоритмов в САУ не гарантирует доступность электроэнергии для потребителей в конкретный момент времени [23].

Анализ работ [14–23] показывает, что в них не рассмотрены вопросы преобразования пассивной распределительной сети в микросети переменного и переменного-постоянного тока, а также подходы к созданию САУ

микросетей и систем защит с учетом технико-экономических показателей.

В данной статье приведен обзор подходов к созданию микросетей переменного и переменного-постоянного тока на базе существующей пассивной распределительной сети с анализом возникающих проблемных вопросов, а также представлены предложения по их решению.

Статья имеет следующую структуру. В разделе 1 приведены результаты анализа проблемных вопросов, возникающих при создании микросетей переменного и переменного-постоянного тока на базе существующих пассивных распределительных сетей. В разделе 2 приведен обзор методик анализа существующей пассивной распределительной сети с целью выбора вида тока для всей микросети или отдельных ее частей, оптимальных точек подключения и мощности РИЭ с учетом информации о состоянии коммутационных аппаратов и ИКИ. В разделе 3 приведены подходы к выбору оптимальной конфигурации микросетей, САУ микросетей и систем защиты с оценкой технико-экономических эффектов.

1. ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ МИКРОСЕТЕЙ НА БАЗЕ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ПАССИВНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

1.1. Общие требования к микросетям

Обобщенно микросети являются современной версией масштабируемых активных систем электроснабжения с разнородными РИЭ, что позволяет иметь достаточную вариативность при их практической реализации [24]. Широкая география реализации проектов микросетей, а также большое количество научных исследований и инновационных разработок различных компонентов для микросетей позволили разработать различные методики. В качестве специализированных исследовательских инстру-

ментов использовались разработанные экспериментальные микросети для установления критериев по их проектированию, оценке эксплуатационных характеристик и технико-экономических эффектов. В работах [24–26] рассмотрены отдельные аспекты проектирования, эксплуатации и тестирования микросетей, которыми руководствуются при их функционировании в составе распределительных сетей. Основные компоненты микросети приведены на рис. 1 [27].

Однако такой подход носит частный характер, так как направлен исключительно на оптимизацию функционирования микросетей в составе распределительной сети, к которой они подключены [28]. Тестирование микросетей может производиться на экспериментальной модели, реализованной в распределительной сети, или на имитационной модели. Однако разработка и создание имитационных моделей микросетей, несмотря на относительно небольшую стоимость, не получили широкого применения [29].

В настоящее время известны две основные концепции создания микросетей: американская, разработанная Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS) [30], и европейская, представленная в проектах Microgrids и More Microgrids [31]. Наибольшее распространение получила концепция CERTS, в которой микросети являются энергетическими кластерами на основе РИЭ, включающими в себя производство, накопление и потребление электроэнергии, а также рекуперацию тепловой энергии, функционирующими как единый объект управления. Европейская концепция микросетей рассматривает только вопросы электроснабжения потребителей. Известны и другие проекты микросетей, отличающиеся размером, составом РИЭ, подходами к реализации САУ, систем защиты и ИКИ, способами интеграции в распределительные сети и др. [32].

ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ МИКРОСЕТИ



Рис. 1

В САУ экспериментальных и имитационных моделей микросетей используются различные подходы к организации управления: централизованный [33], децентрализованный [34] и распределенный, основанный на мульти-агентных технологиях [35]. Учитывая географическое положение реализованных проектов микросетей, можно сделать выводы о предпочтениях в применении подходов к реализации САУ: в азиатских странах подход централизованный, в странах Северной Америки — децентрализованный, в странах Европы — централизованный или распределенный [36].

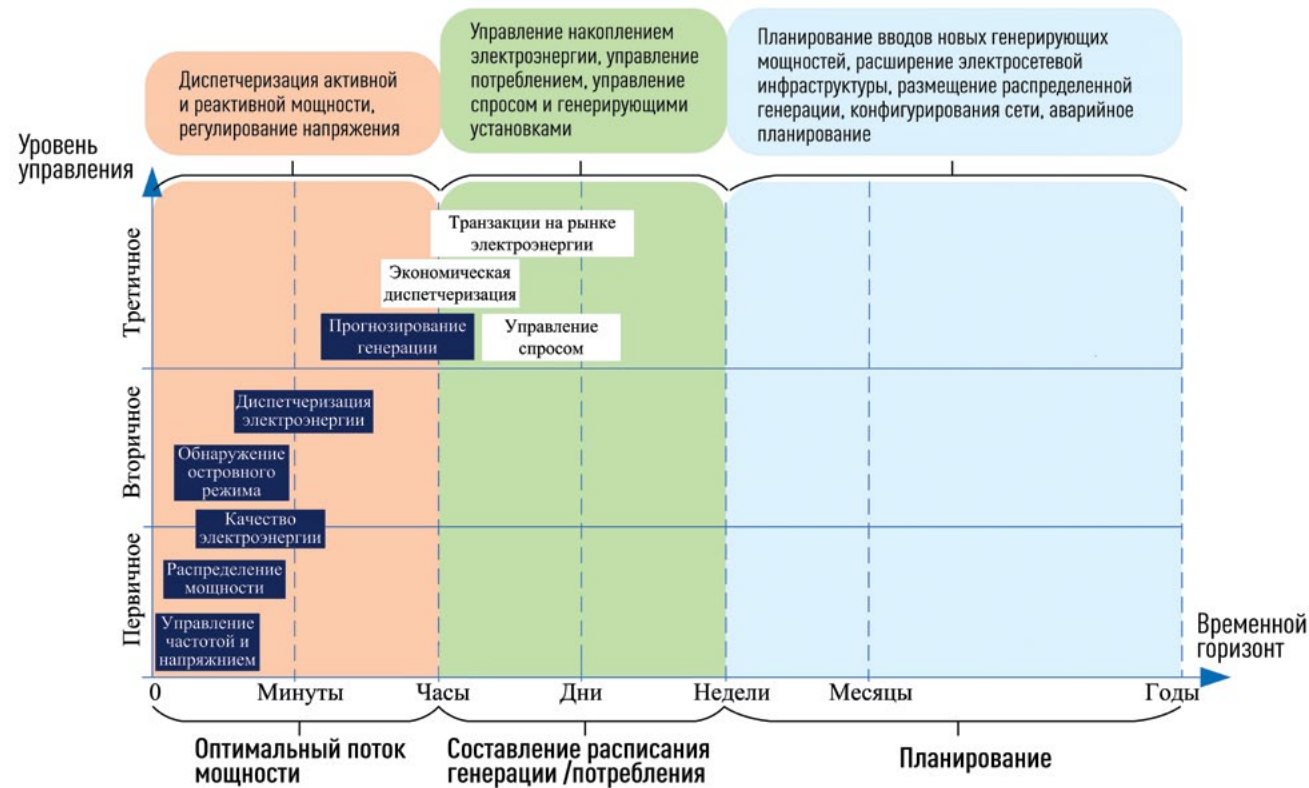
Создание микросетей позволяет повысить надежность электроснабжения потребителей, качество электроэнергии, снизить потери электроэнергии и мощности, а также получить положительные экологические и экономические эффекты от применения РИЭ на основе ВИЭ и продаж излишков электроэнергии. Создание микросетей позволяет снизить эксплуа-

ционные расходы на содержание электросетевой инфраструктуры [37]. Инвестиционная привлекательность микросетей для просьюмеров позволяет осуществить модернизацию существующей распределительной сети и ИКИ [38].

Наибольший экономический эффект от создания микросетей возможно получить при комплексном подходе к решению всего спектра задач: определение оптимального состава и мощности РИЭ, точек подключения микросетей к распределительной сети, модернизация коммутационных аппаратов и измерительных устройств (датчиков тока и напряжения), выбор оптимального подхода к реализации управления и создание под него необходимой ИКИ и др. Применение комплексного подхода при создании микросетей позволит получить в результате полноценные микросети. Например, созданные микросети будут иметь ограничения по возможным вариантам реконфигурации, что является одной

ВРЕМЕННОЙ ГОРИЗОНТ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ В МИКРОСЕТЯХ

Рис. 2



из наиболее важных функциональных особенностей, из-за недостаточного количества дистанционно управляемых коммутационных аппаратов или слаборазвитой ИКИ [39].

1.2. Задачи оптимизации в микросетях

Известно множество критериев для классификации микросетей, например по виду тока, уровню напряжения, составу РИЭ, величине суммарной мощности, количеству обслуживаемых потребителей, количеству точек присоединения к распределительной сети, объему управляемой нагрузки и др. Однако во всех микросетях необходимо решать три группы оптимизационных задач, каждая из которых должна решаться на разных временных интервалах: ОПМ, решение задачи поиска расписания (составление расписания гене-

рации/потребления) и планирование (рис. 2) [40].

Эффективность микросетей оценивается по полученным экономическим результатам, зависящим от стоимости производства и передачи электроэнергии в них, а также от баланса во взаиморасчетах с распределительной сетью, в которую выдаются излишки или из которой покрывается дефицит мощности.

Задачи ОПМ и поиска расписания — прикладные и решаются посредством реализации алгоритмов управления в САУ микросетей, которые могут быть обновлены (изменены) в процессе эксплуатации [41]. Задача поиска расписания — основополагающая, так как обеспечивает минимизацию инвестиционных затрат на создание и развитие микросетей. Кроме того,

при оптимальном расписании решается задача сохранения устойчивости микросетей в различных сценариях, в том числе в островном режиме, что необходимо для обеспечения надежности электропитания потребителей и качества электроэнергии.

1.3. Планирование создания и развития микросетей

Традиционно планирование создания и развития микросетей основано на детерминистском подходе, но из-за роста количества неопределенностей и больших инвестиционных затрат на оборудование этот подход теряет свою актуальность [42]. Для повышения инвестиционной привлекательности микросетей необходимо использовать современные методы планирования, основанные на анализе рентабельности в усло-

виях неопределенности, с целью достижения требуемой экономичности, надежности и масштабируемости решений [43]. Планирование создания и развития микросетей включает в себя пять этапов: выбор технологий генерации и параметров СНЭЭ, определение размера микросети, выбор точек подключения микросетей к распределительной сети, формирование расписания использования энергоресурсов и ценообразование [44]. Окончательное заключение об эффективности принятых решений принимается при проверке на экспериментальной модели, с учетом выбранного подхода к организации управления. Одновременно проводится анализ чувствительности параметров проекта микросети к изменению различных факторов (значений независимой переменной на зависимую переменную при принятых допущениях).

1.3.1. Выбор технологий генерации и параметров СНЭЭ

Тиражирование технических решений для микросетей возможно по причине их компактного исполнения и основано на выборе структуры генерации — количества, суммарной и единичной мощности РИЭ на основе ВИЭ, а также топливных РИЭ [45]. Традиционный подход к выбору структуры генерации в составе микросетей основывается на результатах анализа доступных ВИЭ (уровень инсоляции, среднегодовая скорость ветра). Так как эти параметры являются уникальными для конкретного месторасположения микросети, то это ограничивает возможность тиражирования решений в другие регионы. Для повышения инвестиционной привлекательности микросетей доля РИЭ на основе ВИЭ в структуре генерации должна быть выше, чем топливных РИЭ. Преобладание стохастической генерации при изменчивости и неопределенности электропотребления приводит к возникновению мгновенных небалансов мощности, что негативно сказывается на устойчивости микро-

сети. Для компенсации мгновенных дефицитов/избытков мощности в микросетях применяются СНЭЭ, что повышает устойчивость и надежность функционирования, а также снижает нормированную стоимость электроэнергии [46].

Основная проблема применения СНЭЭ в микросетях связана с корректным определением параметров СНЭЭ (мощность, энергоемкость) для обеспечения устойчивости [47]. Выбор СНЭЭ с неоптимальными параметрами приводит либо к увеличению стоимости СНЭЭ и микросети в целом, а также к росту потерь электроэнергии в СНЭЭ, либо к нарушению устойчивости микросети в определенных сценариях [48].

1.3.2. Определение размера микросети

Основными целями при определении размера микросети являются экономическая эффективность (низкие инвестиционные и эксплуатационные затраты), энергоэффективность (низкие потери электроэнергии и мощности) и надежность [49]. Для этого проводится анализ статистических данных (кривые спроса) с целью выделения характерных точек пикового и базового электропотребления, а также учитывается величина резерва мощности для обеспечения надежности электропитания потребителей [50].

Наиболее сложной задачей является установление корреляционных зависимостей между колебаниями спроса на электроэнергию и конкретными производственными процессами в микросети. Это требуется для определения необходимой величины генерации в каждый момент времени и способов поддержания баланса мощности [51]. Поэтому выбор оптимального размера микросети основывается на результатах анализа статистических данных, возможностях по снижению платы за мощность, мощности и энергоемкости СНЭЭ, а также на возможностях САУ по управлению режимами.

1.3.3. Выбор точек присоединения микросети

Как отмечалось ранее, микросети могут работать как в сетевом (параллельная работа с распределительной сетью), так и в островном режиме. В некоторых случаях оправдана работа микросетей в автономном режиме, т.е. без связи с распределительной сетью [52]. Принятие решения по интеграции микросетей в распределительную сеть с выбором одной или нескольких точек оптимального подключения или выбором автономного режима должно быть основано на количественных оценках. При этом следует проанализировать все потенциальные точки подключения как на момент создания микросети, так и с учетом перспектив ее развития. Решение основывается на определении точки безубыточности, когда производить и распределять электроэнергию внутри автономной микросети дешевле, чем расширять распределительную сеть и покупать электроэнергию у энергосбытовой компании (ЭК). Точка безубыточности имеет индивидуальный характер, зависящий от месторасположения объектов распределительной сети и величины электропотребления в микросети [53].

Место размещения микросети определяет возможности по ее развитию [54]. Рыночные механизмы позволяют оптимизировать процесс выбора точки подключения микросети к распределительной сети с учетом пространственных и мощностных параметров. Пространственное моделирование позволяет выявлять полезные закономерности в пространстве данных, которые не очевидны для их пользователей, для прогнозирования электропотребления с привязкой к месторасположению [55]. Это позволяет применить локальное предельное ценообразование — механизм использования рыночных цен на электроэнергию для управления перегрузками электросетевой инфраструктуры. Этот механизм дает возможность определять предельные величины мощности

и их стоимость в каждом узле электропотребления на основании результатов торгов на рынке конкурентного отбора мощности. При этом формируются соответствующие экономические сигналы для всех участников рынка электроэнергетики [56].

1.3.4. Формирование расписания использования энергоресурсов

Контроль за потреблением всех энергоресурсов в микросети позволяет существенно повысить ее экономичность. Имитационная модель микросети позволяет прогнозировать генерацию/потребление электроэнергии, а также определять оптимальные режимы функционирования всех РИЭ с учетом конфигурации микросети и алгоритмов управления, реализованных в САУ [57].

Экономичность функционирования микросети в первую очередь определяется алгоритмами управления, реализованными в САУ. В связи с этим САУ микросети должна обеспечивать реализацию:

- онлайн-мониторинга — данные о текущем электропотреблении позволяют выявлять периоды, в которых возникает нежелательное потребление электроэнергии из распределительной сети [58]. При наличии в микросети производственных процессов требуется осуществлять согласование роста/спада электропотребления с графиками работы РИЭ;
- оптимальных алгоритмов управления — данные об электропотреблении позволяют определить коэффициенты спроса для каждого потребителя [59]. Это дает возможность получать существенную экономию невозобновляемых энергоресурсов за счет максимальной загрузки РИЭ на основе ВИЭ и оптимального использования СНЭЭ.

1.3.5. Ценообразование в микросети

Прогнозирование не только объемов выработки электроэнергии, но и ее

стоимости позволяет принимать оптимальные решения при планировании режимов работы микросети [60]. Это позволяет энергосбытовым компаниям взамен реагирования на спрос установить фиксированный тариф на электроэнергию в периоды ее потребления из распределительной сети [61], что, в свою очередь, приводит к повышению энергоэффективности и управляемости в распределительной сети благодаря эффективному управлению спросом на электроэнергию. Надежное покрытие графиков нагрузки потребителей возможно при стабильной выработке электроэнергии РИЭ, что делает стратегию динамического ценообразования и реагирования на спрос малопривлекательной [62].

1.4. Управление и защита в микросетях

Интеграция микросетей в пассивную распределительную сеть позволяет, помимо повышения надежности электроснабжения и качества электроэнергии, повысить наблюдаемость и управляемость. Однако при этом возникает новая задача по обеспечению динамической устойчивости РИЭ в аварийных и послеаварийных режимах из-за малых значений механических постоянных инерции. Это накладывает ограничения на допустимые режимы работы микросетей, а также на алгоритмы управления и их быстроедействие, реализуемые в САУ [5]. Учет этих факторов позволяет получить максимальный технико-экономический эффект от использования разнородных РИЭ в составе микросетей и содействовать формированию активной распределительной сети.

Наличие множества конфигураций микросетей, различающихся в том числе видом тока во всей микросети или отдельных ее частях, оказывает влияние на выбор алгоритмов САУ и системы защиты. В микросети постоянного тока требуется провести замену коммутационных аппаратов (автоматические выключатели, предохранители)

и измерительных трансформаторов тока и напряжения на датчики постоянного тока [63].

Наличие разнородных РИЭ в составе микросетей, имеющих разные уставки защит и допустимые диапазоны работы, оказывает влияние на характер и параметры переходных процессов. Это требует разнесения во времени отдельных алгоритмов управления посредством выстраивания иерархической последовательности реализации управляющих воздействий и соответственно реализации в САУ микросетей иерархической структуры, имеющей три уровня управления (иногда добавляется нулевой уровень — уровень управления СЭП). При этом задачи надежности электроснабжения потребителей и качества электроэнергии решаются на первичном и вторичном уровнях управления [5], обеспечения экономической эффективности — на третичном. При реализации алгоритмов управления САУ должны учитываться особенности микросети: двунаправленные перетоки мощности, малые значения механических постоянных инерции РИЭ, стохастический характер выработки электроэнергии РИЭ на основе ВИЭ, изменчивость и неопределенность электропотребления, кратковременные колебания параметров режима в переходном процессе при переходе микросети из сетевого режима в островной.

На физическом уровне САУ может быть реализована с применением различных подходов к организации управления — централизованного, децентрализованного и распределенного. Выбор подхода определяется целями создания и особенностями микросетей, а также наличием необходимых ресурсов и оборудования, соответствующих требованиям. Важную роль играет наличие/отсутствие каналов связи между центральным и локальными контроллерами либо между локальными контроллерами [64]. Степень децентрализации зависит от функциональных возможностей

и алгоритмов управления в САУ микросети, а от также вычислительной мощности локальных контроллеров [65]. Оказание системных услуг повышает технико-экономическую эффективность микросетей, для чего требуется организация взаимодействия центрального контроллера микросети с энергосбытовой компанией и распределительной сетью.

Выполнение функций защиты в микросетях сводится к правильной идентификации и локализации места повреждения с максимально высоким быстродействием. Поэтому к системе защиты микросети предъявляются требования по селективности, быстродействию, надежности, чувствительности и экономичности. Система защиты должна надежно функционировать при возникновении известных трудностей (двунаправленные перетоки мощности, задержка срабатывания защит, существенное снижение уровня токов КЗ при переходе микросети из сетевого режима в островной и др.).

1.5. Информационно-коммуникационная инфраструктура микросетей

Создание полнофункциональной микросети невозможно без наличия ИКИ, которая состоит из устройств и систем, которые были в исходной пассивной распределительной сети, а также новых устройств и систем, которые вводятся в эксплуатацию при создании микросети [66]. К ИКИ относится в первую очередь сеть передачи данных от периферийных устройств, установленных на электрооборудовании (локальных контроллеров), до центра принятия решений в микросети — центрального контроллера [67]. Особое внимание в отношении ИКИ при создании микросети следует уделять выбору из доступных информационно-коммуникационных технологий (ИКТ).

В общем случае ИКТ можно разделить на проводные и беспроводные. Беспроводные ИКТ используют нефи-

зическую среду для передачи данных между устройствами и системами, в то время как проводные ИКТ — физически реализованную среду (кабели, оптическое волокно). Обычно беспроводные ИКТ передают данные через воздушную среду с помощью электромагнитных волн в радиочастотном и инфракрасном спектрах. К беспроводным ИКТ относятся следующие известные системы связи: GSM, GPRS, 3G, WiMAX, Zigbee, Wi-Fi, Bluetooth, Wireless Mesh [68]. Для передачи данных в проводных ИКТ, помимо специализированных кабелей (четыре витые пары, используемые в компьютерных сетях Ethernet), могут применяться силовые кабели с применением интерфейса Power Line Communication (PLC).

Каждый вид и тип ИКТ имеет свои преимущества и недостатки, которые при сравнительном анализе по одному или нескольким критериям (например, пропускная способность и максимальная скорость передачи данных) могут быть более или менее предпочтительны. Важно подчеркнуть, что неправильный выбор ИКТ может привести к нарушению нормальной работы САУ микросети и системы защиты с соответствующими последствиями [69]. Таким образом, правильный выбор ИКТ для создания ИКИ в микросетях является многокритериальной задачей, требующей особого внимания.

2. РЕАЛИЗАЦИЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ В МИКРОСЕТЯХ

Все методики, применяемые при создании микросетей, можно разделить на две основные группы. Первая группа включает в себя спектр вопросов, относящихся к созданию микросетей посредством анализа существующей распределительной сети для выбора вида тока для всей микросети или отдельных ее частей, оптимальных точек подключения микросети, структуры и мощности РИЭ. На этом этапе учет ОПМ и задачи поиска расписания

позволяет оценить техническую эффективность принимаемых решений, обеспечивающих живучесть микросети. Вторая группа включает в себя вопросы выбора оптимальной конфигурации микросети, САУ микросети, системы защиты и ИКИ с оценкой технико-экономических эффектов от их реализации [70].

При решении оптимизационных задач в микросети (ОПМ, задачи поиска расписания и планирования) часто используют различные метаэвристические методы. Их применение дает хорошие результаты при решении многокритериальных задач, свойственных микросетям с преобладанием стохастической генерации на основе ВИЭ, а также изменчивого и неопределенного электропотребления [71].

К метаэвристическим методам относятся [72]:

- эволюционные вычисления — методы, моделирующие эволюцию членом популяции (генетические алгоритмы, дифференциальная эволюция);
- методы роевого интеллекта — методы, отражающие свойства самоорганизующихся групп биологических организмов, имеющих «умное» глобальное поведение (муравьиные колонии, алгоритм поиска гармонии, оптимизация роя частиц и др.);
- искусственные иммунные системы — методы, вдохновленные теоретической иммунологией и моделирующие процессы, используемые иммунной системой для реагирования на внешние угрозы;
- метаэвристика, не основанная на популяции — методы, основанные на поиске одного решения, т.е. временно принимающие наилучшее решение с вероятностью,

которая уменьшается по мере прохождения итераций (имитация отжига, табу поиска).

Возможность применения конкретных метаэвристических методов определяется исходя из располагаемой вычислительной мощности контроллера и количества оценок сходимости функции [73]. Например, эволюционные вычисления, основанные на генетических алгоритмах [74], применимы к любым конфигурациям микросетей, позволяют интегрировать гибридные подходы, легко масштабируются и не накладывают ограничений на выполняемые ими функции. Однако работа алгоритма определяется качеством кодирования задачи оптимизации, а также ее чувствительностью к параметрам настройки. В то же время метод дифференциальной эволюции, имеющий большую скорость сходимости функции, чем генетический алгоритм, прост и надежен и применяется к задачам оптимизации с ограничениями, требующим относительно небольшого количества управляющих переменных. Однако данный алгоритм сильно зависит от параметров настройки, которые определяют эффективность сходимости [75].

Для применения методов роевого интеллекта не требуется специальное кодирование. Например, метод оптимизации роя частиц достаточно прост в реализации и в сочетании с эффективностью является оптимальным решением в случае ограниченности вычислительной мощности контроллера [76].

Искусственные иммунные системы формируются на базе распределенной модели управления, когда отсутствует единый центр управления и для них требуется только локальная информация. Эти методы нуждаются в минимальной вычислительной мощности в отличие методов, основанных на популяции. Однако эти методы требуют настройки для решения задач оптимизации в отличие от эво-

люционных вычислений и методов роевого интеллекта [77].

Методы метаэвристики, не основанные на популяции, имеют меньшие требования к вычислительной мощности, чем другие методы, но у них и самая низкая точность, что для решения ряда задач в микросетях не подходит [78].

Для оценки эффективности микросети следует использовать экономические критерии и методы, основанные на искусственном интеллекте. При отсутствии сходимости эффективно применение комбинаций двух или более алгоритмов, формирующих гибридный алгоритм оптимизации [79].

2.1. Методы определения оптимального потока мощности и решения задачи поиска расписания

В [80] рассматривается применение экономической диспетчеризации в микросетях, при которой минимизируются затраты на топливо для топливных диспетчируемых и недиспетчируемых РИЭ с различными эксплуатационными ограничениями. Задача оптимизации при этом решается с использованием четырех методов: метода прямого поиска, оптимизации роя частиц, метода лямбда-итераций и безытерационного метода, основанного на лямбде-логике.

В [81] предлагается выполнять технико-экономический анализ эффективности микросетей на основе стоимости электроэнергии при работе в сетевом и автономном режиме. При этом следует проводить комплексный анализ располагаемой мощности диспетчируемых и недиспетчируемых РИЭ с учетом ежегодного роста электропотребления на 12%.

В [82] приводится информация о разработке оптимальной структуры микросети, обеспечивающей максимальную устойчивость, а также возможность частичного или полного восстановления. Для решения нели-

нейной задачи предлагается применять разработанный эвристический метод, представленный в двух версиях. Первая версия — стационарный эвристический метод, который использует для решения проблемы статические сценарии наихудшего случая. Вторая версия — зависящий от времени эвристический метод, осуществляющий поиск оптимального решения в дискретном представлении временной области.

В [83] представлена модель оптимизации для минимизации эксплуатационных расходов в микросетях, использующая генетический алгоритм. При этом существенное внимание уделяется ценовому аспекту, связанному с реакцией на рост электропотребления. Кроме того, в работе приведены результаты анализа чувствительности к изменению факторов, влияющих на величину эксплуатационных расходов в микросетях.

В [84] предлагается использовать смешанное целочисленное линейное программирование для оптимального проектирования микросетей с дискретным набором компонентов на основе каталога. Кроме того, устанавливается явная зависимость аннуитетных инвестиционных затрат на эксплуатацию топливных РИЭ и СНЭЭ от выбранной конфигурации микросети.

В [85] предложено применять стохастический метод для ОПМ при функционировании микросетей в условиях высокой неопределенности генерации и электропотребления. Для этого используется метод декомпозиции Бендерса, разделяющий задачу ОПМ на главную, связанную с распределительной сетью, и второстепенную, решаемую итеративно с помощью сокращений Бендерса. Применение такого подхода позволяет обеспечить надежное функционирование микросетей после переключений на линиях электропередачи, связывающих микросеть с распределительной сетью.

В [86] рассматривается вопрос применения метода планирования электропотребления на сутки вперед с учетом сетевых ограничений, требующего минимальной вычислительной мощности контроллера. Этот метод основан на использовании алгоритма конусной программы второго порядка — выпуклой релаксации уравнений перетока мощности.

В [87] приводится альтернативный подход к реализации иерархического управления, в котором реализуются только первичный и третичный уровни управления, рассмотренные выше. При этом ОПМ определяется как переток мощности, обеспечивающий минимизацию потерь в микросети посредством применения итерационного алгоритма.

В [88] предложен подход к определению оптимальной конфигурации микросети на основе классификации РИЭ для выбора оптимальной структуры и мощности РИЭ. Для этого используется метод предпочтения по сходству с идеальным решением и заданными критериями оптимизации (максимизация эффективности использования энергоресурсов, минимизация выбросов CO₂, трудозатрат, стоимости электроэнергии и расходов на топливо). Далее с помощью алгоритмов машинного обучения — случайного леса и машины с усилением светового градиента определяется оптимальная структура РИЭ.

2.2. Методы планирования развития микросетей

Методики планирования развития микросетей основаны на моделировании неопределенностей. С этой целью определяется вероятностный переток мощности, рассчитываемый с использованием метода Монте-Карло, что требует значительной вычислительной мощности [89]. Альтернативой этому методу служат аппроксимированные и улучшенные итерационные алгоритмы [90], имеющие хорошую точность оценки переменных и веро-

ятностных показателей, но требующие значительно меньшей вычислительной мощности.

В [89] приводится математическая модель, позволяющая реализовать оптимальное проектирование и эксплуатацию микросетей. Предложенный подход подразумевает учет технических ограничений (по величине перетока мощности из распределительной сети, по электропотреблению в микросети, по заряду/разряду СНЭЭ), а также экономические ограничения на применение различных технологий РИЭ.

В [91] рассмотрен подход к оптимизации структуры микросети при ее создании на базе существующей распределительной сети по принципу браунфилда, подразумевающему покупку или аренду имеющейся электросетевой инфраструктуры. Для этого применяется многокритериальная оптимизация.

В [92] представлена методология оптимизации структуры микросети переменного-постоянного тока, обеспечивающей покрытие графика электропотребления без перетока мощности из распределительной сети. При этом минимизируется стоимость производства электроэнергии в микросети.

В [93] рассматриваются оптимальные размеры микросети с точки зрения выбранных целей оптимизации (минимизация стоимости электроэнергии, максимизация жизненного цикла РИЭ, повышение надежности электроснабжения потребителей в микросети и др.). В качестве метода оптимизации выбран гибридный метод роя частиц и дифференциальной оценки с помощью модуля нечетких целей.

В [94] приводится модель долгосрочного стратегического планирования инвестиций в создание микросетей, позволяющая улучшить экономические показатели и управляемость

распределительной сети. В модели учитываются как существующие микросети, так и новые, что позволяет обеспечить устойчивое функционирование распределительной сети и оптимальное управление ее режимами при работе микросетей как в сетевом, так и в островном режиме.

Принимаемые решения по определению оптимальной структуры РИЭ в конкретной микросети, подключаемой к одной распределительной сети, не позволяют их тиражировать на другие распределительные сети. Процесс поиска аналогичных решений достаточно трудоемкий и малоэффективный. В [95] рассматривается подход к созданию микросетей, исключающий необходимость определения оптимальной точки присоединения к распределительной сети. Он основан на отслеживании информации о первичных энергоресурсах (цена топлива, уровень инсоляции, среднегодовая скорость ветра), которые можно экстраполировать на все микросети, создаваемые в данной местности. Для этого вводится унифицированный индекс с целью определения эффективности применения в структуре генерации микросетей того или иного вида РИЭ. Далее определяется средневзвешенная стоимость электроэнергии для каждого вида РИЭ. Результирующий индекс является суммой трех индексов, учитывающих доступность первичных энергоресурсов в данной местности. В результирующем индексе не учитываются СНЭЭ и ТЭ, так как режимы их функционирования не зависят от месторасположения.

3. ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ САУ, СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ И ИКИ МИКРОСЕТЕЙ

3.1. Выбор оптимальной САУ

САУ микросети должна обеспечить надежное электроснабжение потребителей и качество электроэнергии во всех схемно-режимных ситуаци-

ЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ЗАЩИТЫ МИКРОСЕТИ

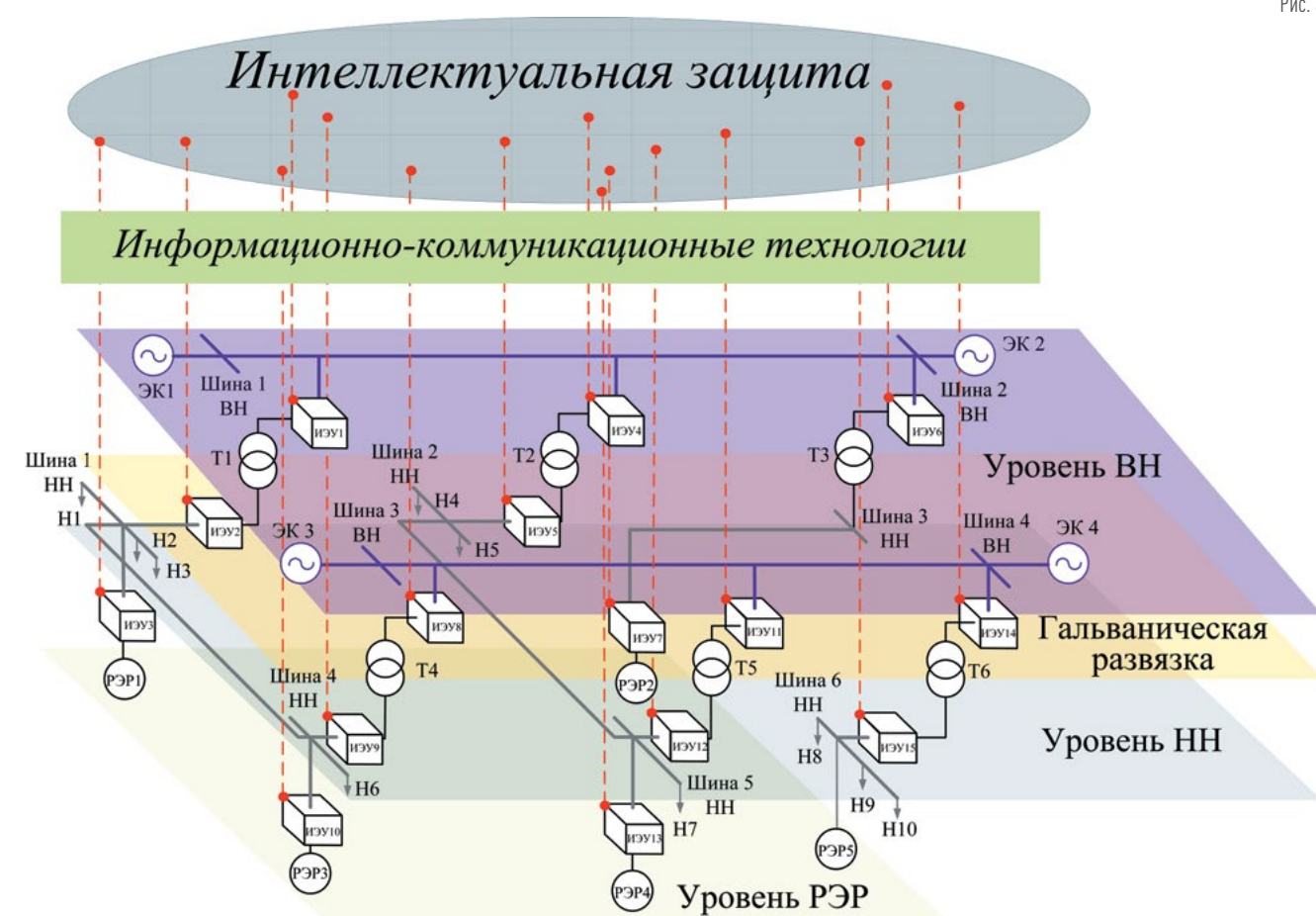


Рис. 3

ях, в том числе в островном режиме, вне зависимости от состояния распределительной сети. При аварийных или аномальных режимах система защиты микросети должна обеспечить быструю локализацию повреждения, а реализация в САУ микросети алгоритмов противоаварийного управления должна восстановить электроснабжение основных потребителей. Реализация в САУ алгоритмов системы управления энергопотреблением позволяет оптимизировать размер микросети и инвестиционные затраты на ее создание [96].

При выборе САУ микросети переменного тока следует учитывать следующее:

- выбор типа САУ должен производиться на основе анализа структуры РИЭ, конфигурации микросети, возможных режимов работы и других факторов;
- алгоритмы управления без использования каналов связи, основанные на статистике регулирования по частоте и напряжению (не зависят от географического расстояния между РИЭ и электроприемниками потребителей) менее эффективны из-за отсутствия обмена информацией между СЭП РИЭ [5];
- САУ на базе децентрализованных алгоритмов получает все большее применение по причине снижения риска отказа из-за

повреждения одного элемента в отличие от централизованных или мультиагентных САУ.

САУ микросети переменного тока имеет особенности:

- для надежного и эффективного управления потоками мощности как внутри микросети, так и с распределительной сетью требуется реализация сложных алгоритмов управления;
- требуется дополнительный промежуточный СЭП между сетью постоянного и переменного тока в микросети для поддержания баланса мощности как в сетевом, так и в островном режиме [5];

- отсутствие общесистемной переменной, используемой для распределения мощности между различными РИЭ, а также для регулирования частоты и напряжения, требует применения САУ со сложной структурой [97].

Для обеспечения надежного функционирования микросетей переменного-постоянного тока в различных схемно-режимных ситуациях желательна наличие дополнительного контроллера, обеспечивающего координацию между частями переменного и постоянного тока.

3.2. Выбор оптимальной системы защиты

Наличие в микросети интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) в виде локальных контроллеров дает возможность уйти от такого понятия, как устройство защиты. Наличие вычислительных мощностей в локальных контроллерах микросети позволяет реализовать на их основе все необходимые функции защиты. Такой подход позволяет реализовать адаптивную систему защиты, превосходящую по своему совершенству традиционно применяемые отдельные защиты (токовые, защиты по напряжению, дистанционные, дифференциальные и др.) [98].

Адаптивная система защиты микросети позволяет адаптировать алгоритмы работы и параметры настройки к особенностям текущего режима, реализовать быстрое самовосстановление нормального режима работы микросети после локализации повреждения, а также восстановить электроснабжение потребителей за минимально возможное время. Это крайне важно, учитывая применение в микросети экономической диспетчеризации [99].

Разработка более совершенных алгоритмов защиты возможна за счет применения:

- методов машинного обучения и искусственного интеллекта;

- устройств широкозонного мониторинга, защиты и контроля (WAMPAC);
- протокола обмена данными по требованиям стандарта МЭК 61850 [100].

Адаптивные системы защиты в автоматическом режиме учитывают кратковременные небалансы активной и реактивной мощности, возможные варианты реконфигурации сети, изменение параметров линий электропередачи, связывающих микросеть с распределительной сетью, а также режимы работы микросети (сетевой, островной).

Адаптивная система защиты микросети может быть реализована на базе децентрализованного или централизованного подхода. При этом защита на базе децентрализованного подхода имеет два варианта исполнения: с наличием связи с соседними контроллерами (адаптивная мультиагентная защита) [101] и отсутствием такой связи (применяются интеллектуальные алгоритмы на базе искусственных нейронных сетей, метаэвристики и нечеткой логики) [102].

Защиты на базе централизованного подхода требуют наличия широкополосных каналов связи и высокопроизводительных контроллеров для выявления и локализации любых видов повреждений за время не более 10 мс. Пример реализации централизованной адаптивной системы защиты микросети, в которую входят два уровня передачи информации: среда передачи данных (уровень 2) и среда субпередачи данных (уровень 1), приведен на рис. 3 [103].

Обмен информацией между контроллерами всех уровней (передача и субпередача данных) позволяет обеспечить селективность действия централизованной адаптивной системы защиты во всех схемно-режимных ситуациях при любой конфигурации микросети.

В качестве протокола передачи данных между уровнями в централизованной адаптивной системе защиты может быть использован IEEE 802.16 WiMAX, позволяющий значительно удешевить ее реализацию [104].

3.3. Выбор оптимальных ИКТ

Информационно-коммуникационная инфраструктура, создаваемая при цифровизации существующей распределительной сети, позволяет решать широкий круг технологических, экономических и других задач, в том числе задачу оказания дополнительных услуг участниками микросетей. При создании микросети к ИКТ предъявляются следующие основные требования: малая мощность электропотребления, широкий спектр сигнала, высокая пропускная способность, большая зона покрытия сигнала и высокая рентабельность. Принимая во внимание перечисленные требования, при выборе ИКТ для конкретной микросети следует учитывать преимущества и недостатки каждой из них (приведены в таблице) и находить компромисс [105].

Например, GSM и GPRS работают в одном частотном диапазоне с одинаковой зоной покрытия сигнала, при этом GPRS имеет лучшую скорость передачи данных. У WiMAX наилучшие показатели по скорости передачи данных, но его электропотребление является самым большим. Поэтому выбор ИКТ для конкретной микросети требует решения многокритериальной задачи, зависящей от набора основных и дополнительных целей ее применения.

В [106] приведены результаты многокритериальной оценки ИКТ. Для оценки значимости отдельных критериев использовались различные методы, которые были разделены на объективные, субъективные или комплексные. Определяющими при выборе ИКТ являлись объективные методы оценки, включающие единый метод взвешивания (UWM), метод важности критериев через межкритериальную корреляцию

КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИКРОСЕТЯХ

Тип	Технология	Скорость передачи	Радиус действия	Топология сети	Максимальное количество узлов/ячеек	Ограничения	Применение
Беспроводной	GSM	До 14,4 кбит/с	0,5–35 км	Многоточка-многоточка	7 ячеек/ 9, 12, 13 кластеров	Низкая скорость передачи данных	РИИ, ДС, управление спросом
	GPRS	До 170 кбит/с	0,5–35 км	Многоточка-многоточка	7 ячеек/ 9, 12, 13 кластеров	Низкая скорость передачи данных	РИИ, ДС, управление спросом
	3G	До 2 Мбит/с	0,1–10 км	Многоточка-многоточка	1–7 ячеек	Дорогостоящий спектр	РИИ, ДС, управление спросом, мониторинг удаленного распределения
	ZigBee	250 кбит/с	10–100 м	Звезда, ячеистая, кластерное дерево	Более чем 65 000 ячеек	Низкая скорость передачи данных, близкое действие	Автоматизация, дистанционное управление нагрузкой, РИИ
	WiMAX	До 50 Мбит/с	10–50 км (ЛПВ)/ 1–5 км (ОПВ)	Точка-многоточка; многоточка-многоточка	1 ячейка	Малый опыт использования	РИИ, управление спросом, беспроводное автоматическое считывание показаний счетчиков
Проводной	PLC	До 0,5/200 Мбит/с	3/0,2 км	Звезда, точка-точка	1 ячейка	Жесткий шум в среде канала	РИИ, обнаружение мошенничества

Примечание. РИИ — развитая измерительная инфраструктура; ДС — домашняя сеть; ЛПВ — линия прямой видимости; ОПВ — отсутствие прямой видимости.

(CRITIC) и метод энтропии (ENTROPY). В итоге был составлен рейтинг ИКТ, приведенный на рис. 4 [106].

Таким образом, WiMAX наиболее подходит для создания ИКИ в микросетях, а PLC — наименее.

Заключение

Создание микросетей требует реализации комплексного подхода к модернизации существующей распределительной сети (коммутационные аппараты, измерительные устройства, информационно-коммуникационная инфраструктура) и решению задач ОПМ, поиска расписания и планирования.

Обеспечение надежного электроснабжения потребителей и качества электроэнергии в микросетях возможно при корректной работе системы защиты и САУ в различных схемно-режимных ситуациях. Значительное влияние на экономические показатели работы микросетей оказывает выбор ИКИ, определяющей возможность применения различных подходов и алгоритмов в системе защиты и САУ.

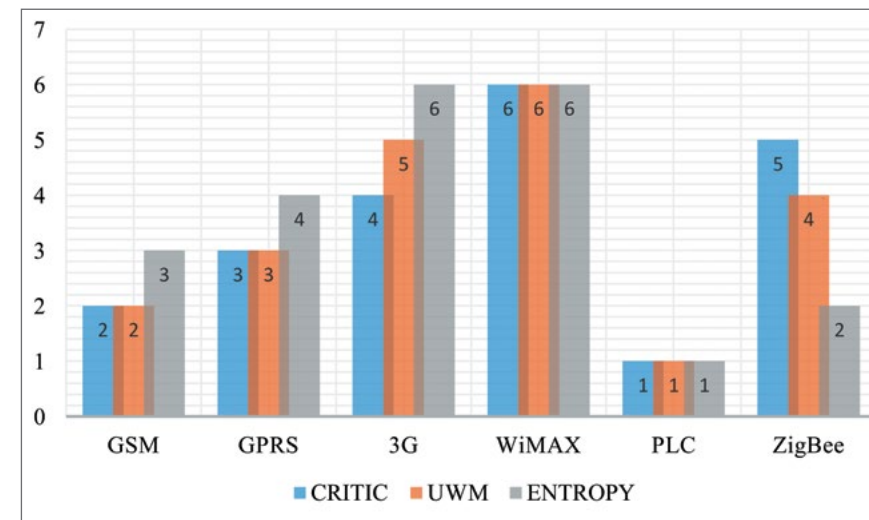
Выбор оптимальной системы защиты и САУ для конкретной микросети является многокритериальной задачей. Наибольшими преимуществами при создании системы защиты обладает централизованный подход, но он требует наличия ИКИ. При создании

САУ микросети наиболее предпочтительным является децентрализованный подход, позволяющий снизить риск отказа САУ из-за повреждения центрального контроллера или одного элемента ИКИ. Однако при децентрализованном подходе к построению САУ невозможно реализовать экономическую диспетчеризацию, содействующую повышению инвестиционной привлекательности микросети. Оптимальным является распределенный подход к построению САУ, требующий наличия каналов передачи данных между локальными контроллерами микросети.

Корректный выбор ИКТ позволяет решать широкий круг технологических,

РЕЙТИНГ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рис. 4



экономических и других задач, в том числе задачу оказания дополнительных услуг участниками микросетей.

Учет в алгоритмах САУ микросетей нестационарного характера выработки электроэнергии РИЭ на основе ВИЭ, а также изменчивости и неопределенности электропотребления позволяет обеспечить устойчивую работу микросетей в сетевом и островном режиме, а также распределительной сети в целом.

ЛИТЕРАТУРА

- Илюшин П.В. Системный подход к развитию и внедрению распределенной энергетики и возобновляемых источников энергии в России// Энергетик. 2022. № 4. С. 20–27.
- Bassam N.El. Grid challenges: Integration of distributed renewables with the national grid// Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities: Empowering a Sustainable, Competitive, and Secure Twenty-First Century. 2021. P. 451–456.
- López González D.M., Garcia Rendon J. Opportunities and challenges of mainstreaming distributed energy resources towards the transition to more efficient and resilient energy markets//Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 157. P. 112018.
- Sinsel S.R., Riemke R.L., Hoffmann V.H. Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources — a review// Renewable Energy. 2020. Vol. 145. P. 2271–2285.
- Вольный В.С. Илюшин П.В. Обзор принципов построения и методов управления режимами микросетей переменного тока низкого напряжения// Релейная защита и автоматизация. 2023. № 2 (51). С. 28–41.
- Илюшин П.В., Вольный В.С. Обзор структур микросетей низкого напряжения с распределенными источниками энергии//Релейная защита и автоматизация. 2023. № 1 (50). С. 68–80.
- Илюшин П.В. Анализ влияния распределенной генерации на алгоритмы работы и параметры настройки устройств автоматики энергосистем// Энергетик. 2018. № 7. С. 21–26.
- Вольный В.С. Анализ функционирования инверторного оборудования при различных возмущающих воздействиях в электрической сети//Новое в российской электроэнергетике. 2022. № 10. С. 6–17.
- Wang X., et al. Grid-Synchronization Stability of Converter-Based Resources — An Overview//IEEE Open Journal of Industry Applications. 2020. Vol. 1. P. 115–134.
- Ghadi M.J., et al. From active distribution systems to decentralized microgrids: A review on regulations and planning approaches based on operational factors// Applied Energy. 2019. Vol. 253. P. 113543.
- Ghadi M.J., et al. A review on economic and technical operation of active distribution systems//Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 104. P. 38–53.

- Илюшин П.В., Вольный В.С. Обзор методов решения проблемных вопросов функционирования устройств защиты в microgrid напряжением до 1 кВ с распределенными источниками энергии//Релейная защита и автоматизация. 2022. № 4 (49). С. 6–21.
- Илюшин П.В. Анализ обоснованности уставок устройств РЗА генерирующих установок с двигателями внутреннего сгорания на объектах распределенной генерации//Релейная защита и автоматизация. 2015. № 3 (20). С. 24–29.
- Sivakumar K., Jayashree R., Danasagan K. Efficiency-driven planning for sizing of distributed generators and optimal construction of a cluster of microgrids//Engineering Science and Technology, an International Journal. 2021. Vol. 24, № 5. P. 1153–1167.
- Jabbari-Sabet R., Moghaddas-Tafreshi S.M., Mirhoseini S.S. Microgrid operation and management using probabilistic reconfiguration and unit commitment//International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2016. Vol. 75. P. 328–336.
- Dorahaki S., et al. An integrated model for citizen energy communities and renewable energy communities based on clean energy package: A two-stage risk-based approach//Energy. 2023. Vol. 277. P. 127727.
- Hai T., et al. Optimal energy management strategy for a renewable based microgrid with electric vehicles and demand response program//Electric Power Systems Research. 2023. Vol. 221. P. 109370.
- Di Somma M., et al. Stochastic optimal scheduling of distributed energy resources with renewables considering economic and environmental aspects// Renewable Energy. 2018. Vol. 116. P. 272–287.
- Bornapour M., et al. Optimal stochastic scheduling of CHP-PEMFC, WT, PV units and hydrogen storage in reconfigurable micro grids considering reliability enhancement//Energy Conversion and Management. 2017. Vol. 150. P. 725–741.
- Mochi P., et al. Optimizing Power Exchange Cost Considering Behavioral Intervention in Local Energy Community//Mathematics. 2023. Vol. 11. № 10.
- Gielen D., et al. The role of renewable energy in the global energy transformation//Energy Strategy Reviews. 2019. Vol. 24. P. 38–50.

Полный список литературы:

