

## **Концепция сельских электрических сетей 0,4 кВ с управляемой конфигурацией (Виноградов А.В., Виноградова А.В., Лансберг А.А.)**

Сельские электрические сети 0,4 кВ имеют, как правило, радиальную, или магистральную конфигурацию с питанием от одного источника электроснабжения. Проведённый на примере электрических сетей филиалов ПАО «Россети» (рассмотрены 20 регионов ЦФО) анализ длин линий электропередачи (ЛЭП) 0,4 кВ показал, что наибольшая средняя протяженность ЛЭП 0,4 кВ сельских электрических сетей характерна для филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» и составляет 985 метров, а наименьшая – для филиала «Кировэнерго» (737 метров). Среднее значение по регионам ЦФО – 787 метров [21]. Что касается Орёлэнерго, то 74% ЛЭП 0,4 кВ находятся в эксплуатации уже более 35 лет.

Завышенная протяжённость, совместно с износом сетей приводит к тому, что поток отказов в них доходит до 37 год<sup>-1</sup> на 100 км, а время восстановления – до 8 ч. Ущерб от недоотпуска электроэнергии составляют от 30 до 300 руб./кВт·ч и более [22]. Из-за завышенной длины ЛЭП 0,4 кВ ухудшается не только надёжность электроснабжения, но и растут потери энергии [23], снижается качество передаваемой электрической энергии [24]. Например, в Орловской области за 2021 год потребители обращались по поводу искажений качества электроэнергии 1076 раз, а за период с 2018 по 2021 годы – 5215 раз [21].

Влияет протяжённость и состояние сети и на безопасность эксплуатации. Установленные в начале ЛЭП защитные аппараты не чувствуют удалённые однофазные короткие замыкания. Это влечёт за собой опасность поражения электрическим током людей и животных, риск возникновения пожаров. Низкая надёжность сети и большое число плановых отключений для её обслуживания приводит к росту количества покупаемых населением бензиновых (от 154,6 тыс. шт. в 2018 году до 201,2 тыс. шт. в

2021 году согласно исследованиям НИУ ВШЭ) и дизельных генераторов, которые, при неправильном подключении к сети, приводят к несанкционированной подаче напряжения в неё. Растёт число объектов распределённой генерации, разрешено подключение в уведомительном порядке частных генерирующих установок мощностью до 15 кВт. Это может привести к непредсказуемости графиков нагрузки энергосистемы, сложности управления сетями разного класса напряжения, в том числе и 0,4 кВ. Внедрение средств интеллектуализации сетей 0,4 кВ затрудняется существующей конфигурацией сети. Таким образом, концепции построения сельских сетей 0,4 кВ, принятые в 50-70-х годах прошлого века устарели и требуется создание новых, учитывающих тенденции развития всего электросетевого комплекса.

Цель работы заключается в разработке концепции сельских электрических сетей 0,4 кВ с управляемой конфигурацией, позволяющей повысить надёжность электроснабжения сельских потребителей и качество поставляемой им электроэнергии.

В качестве материалов исследования использованы статистические данные по состоянию электрических сетей 0,4 кВ для разных регионов ЦФО, их аварийности, конфигурации. Также материалами исследования послужили авторские разработки средств секционирования и резервирования электрических сетей 0,4 кВ, мониторинга параметров режимов их работы.

Определения конфигурации сети, её параметров приведены в [22]. Под конфигурацией понимается характеристика электрической сети по взаимному расположению на схеме и в пространстве входящих в её состав электроустановок, электрооборудования, а также по соотношению между собой их технических характеристик, а под управлением ею – процесс целенаправленного воздействия (персонала или средств защиты, автоматики) на оборудование сети для достижения необходимой конфигурации.

Параметры конфигурации – это схема сети, расположение её элементов, характеристики электрооборудования, параметры режимов работы [22].

Предлагаемая концепция основывается на следующих принципах управления конфигурацией, подробно раскрытых в [22]:

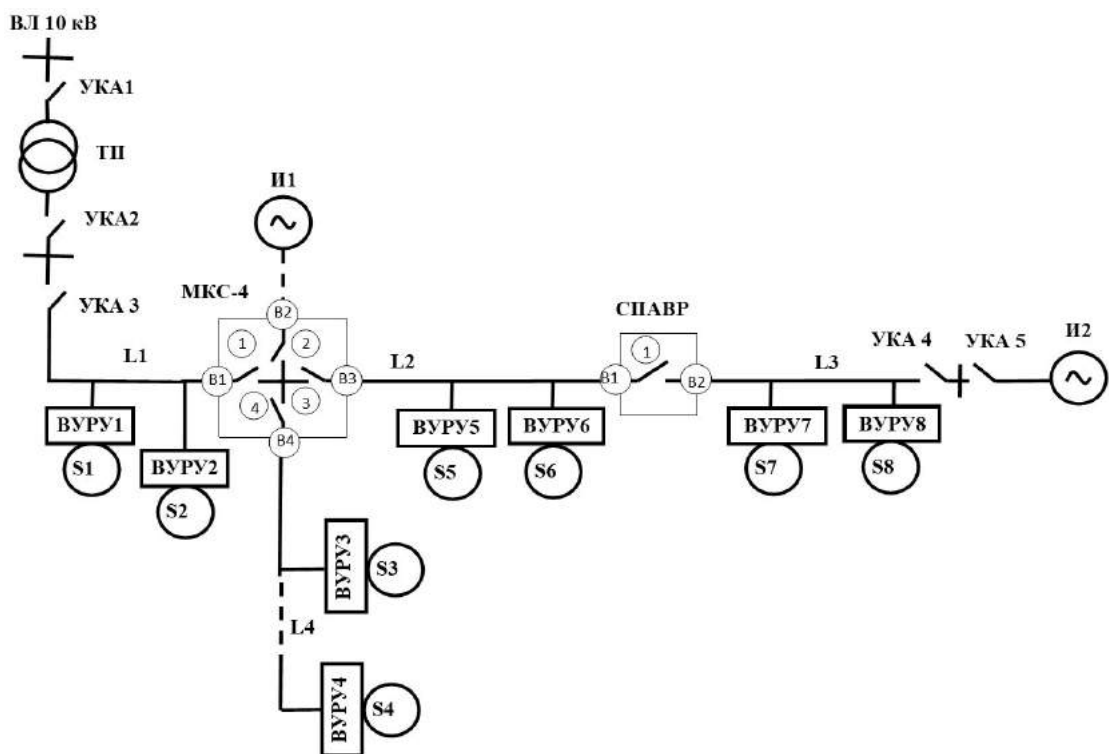
- наблюдаемость, то есть мониторинг параметров режимов работы и состояния оборудования сети;
- управляемость, то есть возможность управления, в том числе автоматического и дистанционного, оборудованием сети;
- гибкость конфигурации, предполагающая способность ручной, автоматической или дистанционной коррекции конфигурации сети;
- сегментируемость, то есть возможность выделения участков сети с распределённой генерацией, которые в зависимости от ситуации могут питаться от своих источников генерации, или от централизованной сети, или от них совместно;
- интеллектуализация оборудования, предполагающая оснащение оборудования сети и потребителей умными системами мониторинга, контроля, учёта и управления;
- интегрированность в экономику, то есть осуществление, за счёт технических средств, экономических механизмов поддержания надежности электроснабжения, качества электроэнергии, обеспечения нормированных сроков технологических присоединений [22].

Предлагаемая концепция, учитывающая приведённые принципы, заключается в следующем. Электрические сети 0,4 кВ должны обеспечивать выполнение принципов управления их конфигурацией за счёт оснащения средствами мониторинга параметров режимов работы и состояния оборудования, средствами автоматизации и защиты, средствами секционирования и резервирования, средствами распределённой автоматизации, средствами умного учёта. Оборудование сети должно оснащаться соответствующими программными средствами, средствами связи, позволяющими объединять их в единые системы мониторинга, учёта, контроля и управления, системы диспетчеризации сети.

Ключевыми техническими средствами, позволяющими осуществлять

концепцию, являются устройства секционирования и резервирования электрической сети 0,4 кВ, в частности, пункты секционирования с функцией автоматического включения резерва (СПАВР), мультиконтактные коммутационные системы (МКС) разных типов, универсальные микроконтроллерные блоки управления коммутационными аппаратами, устройства мониторинга, вводно-учётно-распределительные устройства (ВУРУ) и другие средства, в том числе приведённые в [22], а также в патентах №:2769110, 2726856, 2726644, 2726855, 2726852, 2728768, 2731874, 2732182, 2733217, 2734110, 2736542, 2737965, 2739065, 2739064, 2740075, 2739365, 2745155, 2755156, 2755654, 2755655, 2755658, 2755661, 2755659, 2755528, 2755656, 2755942, 2761860, 2767501, 2767519, 2767479, 2768787, 2769456, 2767502, 2767504, 2767517, 2764280, 2769720, 2769110, 2778135, - и других.

На рис. 18 показана схема электрической сети с управляемой конфигурацией.



*Рисунок 18. – Вариант схемы электрической сети с управляемой конфигурацией*

Схема на рисунке 18 содержит: воздушную линию электропередачи ВЛ

10 кВ, трансформаторную подстанцию ТП, управляемые коммутационные аппараты УКА1-УКА4, ВУРУ1-8, МКС с четырьмя выводами МКС-4, СПАВР, потребителей S1-8, источники генерации И1 и И2.

Управление конфигурацией рассматриваемой электрической сети базируется на применении систем контроля, мониторинга, учёта и управления. В качестве исполнительных элементов систем управления конфигурацией электрической сети применяются УКА, МКС, СПАВР и средства управления генерирующих установок и ТП.

Наличие в сети УКА, МКС-4, ВУРУ и СПАВР позволяет реализовывать принципы управления конфигурацией сети. Это достигается отключением и включением соответствующих контактных групп этих устройств для обеспечения гибкости конфигурации, сегментирования сети, управления нагрузкой источников электроснабжения. За счёт указанных средств линия 0,4 кВ может быть сегментирована на участки L1-L4, получающие питание от одного, или нескольких источников электроснабжения. Имеется возможность переключения этих участков ЛЭП на питание от одного источника к другому. Источник И1, например, может быть мобильным и подключаться к сети для питания её отдельных участков при проведении ремонтных работ на других участках.

Устройства МКС, ВУРУ, СПАВР, УКА оснащаются микроконтроллерными блоками управления, осуществляющими функции мониторинга, контроля, технического учёта (как потребления электроэнергии, так и других параметров), управления. Они, совместно со средствами связи, обеспечивают интеграцию устройств в систему диспетчеризации сети. В качестве каналов связи могут использоваться радиоканалы, GSM, LORA-WAN и другие.

Перспективно применение для передачи информации самонесущих изолированных проводов (СИП) с интегрированным оптическим волокном (ОВ). В частности, на рынке появился СИП-2 с ОВ, который представляет собой три основные токопроводящие жилы из алюминия, нулевую несущую

жилу из алюминиевого сплава и оптический кабель, свитые в один жгут. Волоконно-оптический кабель выполнен в виде скрутки оптических модулей вокруг стеклопластикового прутка и может содержать в себе от 2 до 144 оптических волокон для передачи информации [25]. Применение СИП-2 с ОВ позволяет значительно сократить время передачи информации и организовать онлайн диспетчеризацию сети, построить эффективные средства защиты сети от аварийных режимов.

Система диспетчеризации, управления конфигурацией использует получаемые от устройств данные и выдаёт команды управления, предоставляет необходимую информацию персоналу, управляющему сетью, то есть обеспечивает выполнение принципов управления конфигурацией сети. На рисунке 19 показана структурная схема системы управления конфигурацией электрической сети с учётом включения в неё систем мониторинга, контроля, учёта и управления, реализованных на приведённых выше устройствах.

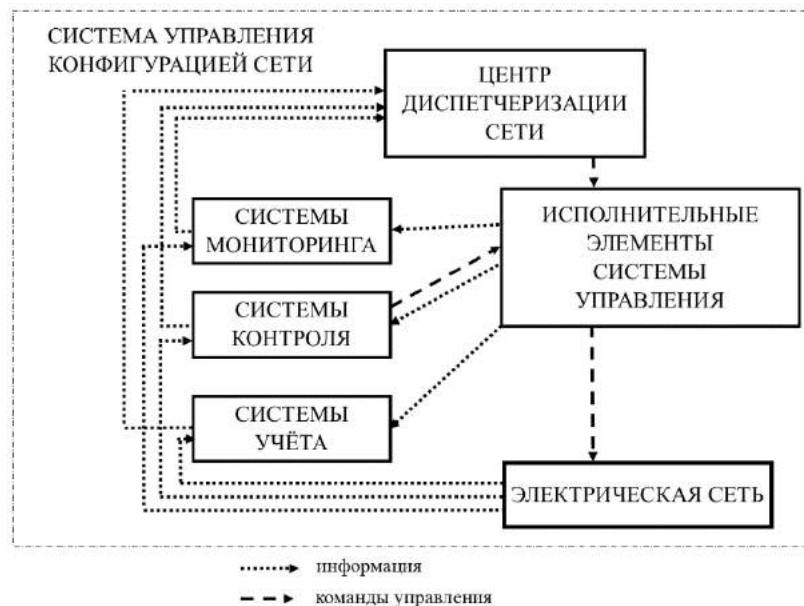


Рисунок 19. – Структурная схема системы управления конфигурацией

Центр диспетчеризации сети (ЦДС) включает в себя блок управления сетью (БУС), кроме того, средства отображения информации о режимах работы сети и состоянии оборудования, средства приёма и передачи данных, персонал, контролирующей сеть и управляющий ею (диспетчеры сети) и их

автоматизированные рабочие места, построенные, например, как показано в [26]. Предполагается в основном автоматическое управление сетью с помощью БУС, а при необходимости – ручное управление, осуществляемое диспетчером, отдающим команды на переключения в сети, на управление оборудованием, регулирующим параметры режима работы сети. При этом задаётся приоритет автоматического и ручного управления на различные операции по управлению сетью. Диспетчер также может перевести управление полностью в ручной режим.

Системы контроля контролируют параметры режимов работы сети в заданных точках сети (как правило, в точках установки оборудования сети), состояние исполнительных элементов, реагируя на значения параметров, при которых необходимо осуществлять управление конфигурацией, например, на появление тока короткого замыкания на определённом участке сети, повреждение оборудования, исчезновение напряжения, изменение перетоков мощности и т.п. При значении параметра, соответствующего заданному, системы контроля выдают сигнал, например, на отключение одного коммутационного аппарата, включение другого. Также системы контроля передают информацию в ЦДС, где принимается решение о других переключениях в сети, необходимых в сложившейся ситуации.

Системы мониторинга осуществляют мониторинг параметров режимов работы в сети, показателей качества электроэнергии (ПКЭ), состояния оборудования, передавая в ЦДС соответствующую информацию. На основе полученных от систем мониторинга данных определяется ситуация в сети, режимы её работы. Средства отображения информации показывают значения параметров режимов работы сети в контрольных точках. Исходя из этого диспетчер, или БУС принимает решение о переключениях в сети, регулировании параметров режимов работы в сети даже в том случае, когда параметры режимов работы сети не достигли заданного значения, при котором управление необходимо.

Системы учёта осуществляют учёт соответствующих параметров, в

частности, потребления электроэнергии участками сети, отдельными потребителями. При этом системы учёта конкретных параметров могут строиться с применением существующего оборудования, схем данных систем [27]. Также осуществляется учёт ресурса оборудования, например, ресурса коммутационных аппаратов, определяемого по количеству срабатываний и коммутируемому при этом значению тока. Осуществляется учёт времени отключений напряжения на участках сети и на вводах потребителей, времени отклонения ПКЭ от нормированных значений, прочих показателей. Системы учёта передают информацию в ЦДС. На основе полученных от систем учёта данных уточняется ситуация в сети, осуществляется прогнозирование. Средства отображения информации показывают значения потребляемой электроэнергии и другие параметры. Исходя из этого диспетчер, или БУС принимает решение о переключениях в сети, управлении потребителями и генерирующими установками даже если параметры режимов работы сети не достигли заданного значения, при котором управление необходимо.

ЦДС осуществляет управление оборудованием сети через исполнительные элементы управления, получающие от ЦДС команды и выполняющие их путём воздействия на оборудование сети.

Как было указано выше, сигналы управления на исполнительный элемент могут поступать как с систем контроля (СК), так и с ЦДС. При этом заранее определяется в какой ситуации сигнал должен прийти с СК, а в какой с ЦДС. Например, при коротком замыкании за СПАВР на участке L2 (при питании его от И2), или L3 (при питании его от ТП, или И1) сигнал на отключение СПАВР, а также на его автоматическое повторное включение поступит с системы контроля, встроенной в сам СПАВР. Если возникает необходимость отключения СПАВР в случае, когда в сети нет аварийного режима, но требуется выполнить изменение конфигурации сети, предположим для переключения участков сети на питание от другого источника электроснабжения, то сигнал поступит с ЦДС.

Кроме перечисленных, в концепции электрических сетей с



управляемой конфигурацией могут использоваться и другие технические средства, предназначенные для повышения надежности электроснабжения и качества электроэнергии. В частности, это цифровые ТП 6-10/0,4 кВ. В предлагаемой концепции ТП оборудуются следующими системами: определения мест повреждений в ЛЭП 0,4 кВ и ТП 10/0,4 кВ; регулирования параметров качества электроэнергии; автоматического регулирования напряжения; автоматизации (АВР, АЧР, АПВ); автоматического регулирования (компенсации) реактивной мощности; умного учёта электроэнергии; другие системы.

При этом в качестве управляемых коммутационных аппаратов на стороне 0,4 кВ могут применяться вакуумные контакторы, а на высокой стороне – вакуумные выключатели. В целом, согласно патентам №2740075, №2734110, это позволит обеспечить ряд положительных эксплуатационных и режимных эффектов для электросетевых компаний, например:

- дистанционный контроль напряжения в сети на конце линий 6-10 кВ с целью решения задачи по регулированию напряжения в центрах питания 35-110 кВ для создания оптимального режима работы сети и снижения потерь электроэнергии при её передаче;

- повышение наблюдаемости и управляемости сети 0,4 кВ за счёт дистанционного контроля режимов работы оборудования трансформаторных подстанций 6-10/0,4 кВ и линий электропередачи 0,4 кВ;

- повышение электробезопасности ЛЭП 0,4 кВ, ТП 6...20/0,4 кВ, ЛЭП 6-10 кВ за счет сигнализации и блокировки несанкционированной подачи напряжения со стороны 0,4 кВ и контроля опасных факторов, согласно патентам №2740002, №2739326;

- сокращение потерь электроэнергии за счёт составления балансов по линиям 6-10 кВ и 0,4 кВ и выявления линий с повышенными потерями с последующей реализацией мероприятий по недопущению несанкционированного потребления электроэнергии;

- сокращение времени перерывов в электроснабжении потребителей за

счёт дистанционного управления оборудованием;

- сокращение времени получения информации об отключениях и оперативного реагирования за счёт применения АПВ ЛЭП 0,4 кВ;

- определение загрузки трансформатора с целью проведения мероприятий по энергосбережению, оценке возможности технологического присоединения новых потребителей к электрическим сетям;

- автоматическое отключение одной из отходящих ВЛ 0,4 кВ на ТП в случае возможной перегрузки силового трансформатора для предотвращения выхода из строя трансформатора или сокращения срока его службы.

Информация со всех указанных и перспективных систем и устройств должна передаваться в ЦДС. Вводы потребителей сельских электрических сетей должны иметь систему учета электроэнергии и ограничения потребляемой мощности, которая реализуется на основе вводно-учетно-распределительных устройств, на которые получены патенты №2739064, №2740076, №2761860.

Таким образом, реализация предлагаемой концепции сельских электрических сетей позволит обеспечить повышение надежности электроснабжения потребителей и качества электроэнергии в сельских сетях.

Повышение качества электроэнергии будет обеспечиваться за счет предотвращения недопустимой работы электрической сети и потребителей, которые вносят искажение в параметры качества электроэнергии ввиду несоответствия режимов работы их электроприемников с договором технологического присоединения, путем производства переключений в электрической сети, а также использования в сельских электрических сетях помимо централизованного источника питания – ТП6-10/0,4 кВ, распределённых источников генерации и (или) систем накопления электрической энергии, оснащенных фильтрокомпенсирующими установками, предназначенными для снижения влияния высших гармоник в сельских сетях.

Предлагаемая концепция предполагает разработку новых типов

оборудования для её реализации. Такая работа уже проводится в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, ФГБОУ ВО Орловском ГАУ, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Это МКС разного типа, СПАВР, ВУРУ, устройства и системы мониторинга, другое оборудование, уже частично внедряемое в электрические сети. Тем не менее, ещё предстоит большая работа по доведению разработанных образцов до их широкого внедрения.

Существующая структура сельских электрических сетей не позволяет в значительной степени осуществлять их дальнейшее развитие. Завышенные протяжённости ЛЭП 0,4 кВ (средняя по ЦФО длина ЛЭП 0,4 кВ 787 м), большой процент износа оборудования (в отдельных регионах более 70% оборудования эксплуатируется более 35 лет), радиальная в большинстве конфигурация приводят к низкой надёжности электроснабжения сельских потребителей (поток отказов до 37 и более год<sup>-1</sup> на 100 км ЛЭП), необеспеченности нормативного уровня качества электроэнергии. Принятые более полувека назад концепции построения сельских электрических сетей устарели, не предполагают внедрения в сетях распределённой генерации, распределённой автоматизации, не готовы к внедрению интеллектуального оборудования и поэтому требуют замены.

Предложена концепция сельских электрических сетей, предполагающая реализацию принципов управления их конфигурацией за счёт оснащения сетей средствами мониторинга, автоматизации и защиты, секционирования и резервирования, средствами распределённой автоматизации и умного учёта. Разработан ряд образцов оборудования, необходимого для её реализации. Концепция согласуется с работой в рамках цифровой трансформации электрических сетей и позволяет повысить надёжность электроснабжения сельских потребителей и качество поставляемой электроэнергии.