

УДК 621.316.1

Н. С. Минин, А. Н. Ожегов, А. А. Закалата

АНАЛИЗ ВНОВЬ РАЗРАБОТАННЫХ СХЕМ ГОРОДСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Перерывы в электроснабжении городов вызывают значительный социально-экономический ущерб, поэтому повышение надежности схем является актуальной задачей. Развитие науки и техники вносят коррективы в сложившиеся устои формирования схем электрических сетей и позволяют добиться новых показателей надежности, безопасности и экономичности. Анализ и внедрение новых схемных решений является неотъемлемой частью совершенствования отечественной электроэнергетики.

В статье проведен анализ традиционных и новых схем электроснабжения городов. Отмечено, что распределительные сети городов выполняются в основном по двум видам схем: петлевым или двухлучевым схемам.

Рассмотрены схемы электроснабжения с использованием трансформаторов с видоизмененными соединениями обмоток; схемы с тремя взаимосвязанными трехфазными подсистемами; схемы со специальным подключением трансформаторов к секциям сборных шин.

Отдельно рассмотрены гексагональные схемы городских распределительных сетей, обозначены достоинства таких сетей.

Большое внимание в статье уделено ограничению токов КЗ, поскольку увеличение токов КЗ в отдельных узлах нагрузки может быть недопустимо по динамической устойчивости.

В статье делается вывод о том, что для уменьшения затрат на резервирование элементов при повышении надежности необходимо рациональное применение различных видов сетей с учетом их достоинств и недостатков.

Ключевые слова: городские электрические сети, анализ схем.

Основными характеристиками систем электроснабжения являются экономичность, надежность, безопасность и удобство эксплуатации, возможность дальнейшего развития. Для систем электроснабжения городов главным образом

обеспечивают надежность, ввиду того что перерыв в электроснабжении даже на короткий срок в крупных городах вызывают значительный социально-экономический ущерб. Рассмотрим возможности повышения надежности систем электроснабжения путем применения новых схем электрических сетей.

Распределительные сети городов традиционно выполняются в основном по петлевым и двухлучевым [1] схемам. Двухлучевые схемы преобразуются в двухлучевые встречные присоединением «концов» лучей к разным секциям другого РП, однако этот принцип построения сетей реализуем в основном при строительстве новых участков из-за требовательности к пропускной способности линий, при модернизации уже существующих сетей повышение надежности возможно путем организации сетевых поперечных связей между схемами рядом расположенных распределительных пунктов [2]. Таким образом, традиционный подход повышения надежности электрических сетей предполагает резервирование, что приводит к увеличению количества элементов сети и снижению экономичности. Развитие науки и техники в последние десятилетия, а также новые инженерные решения вносят коррективы в сложившиеся устои формирования схем электрических сетей и позволяют добиться новых показателей надежности, безопасности и экономичности. Анализ и внедрение новых схемных решений является неотъемлемой частью совершенствования отечественной электроэнергетики.

Основными направлениями развития схем распределительных сетей являются:

- применение нового оборудования;
- разработка новых типов систем электроснабжения;
- применение новых номинальных напряжений.

В данной статье рассматриваются примеры перечисленных методов.

Схемы электроснабжения с использованием трансформаторов с видоизмененными соединениями обмоток

В электрических сетях с изолированной нейтралью 6-35 кВ можно достичь глубокого ограничения токов короткого замыкания (КЗ) без увеличения сопротивления в цепях питания (реактивирования сети) в нормальных режимах за счет применения новых схем подключения к распределительной сети обмоток понижающих трансформаторов, предназначенных для соединения в треугольник. На рис. 1 изображены четыре схемы с понижающими трансформаторами, имеющими одну или две обмотки низкого напряжения (НН). Токи КЗ в схеме с раздельной работой на нагрузку расщепленных обмоток НН (схема на рис. 1в) практически вдвое меньше по сравнению со случаем двухобмоточного трансформатора с соединенными параллельно расщепленными обмотками НН (рис. 1б). Однако в схеме, представленной на рис. 1в, имеем вдвое большее сопротивление цепи питания и, соответственно, ухудшенное качество напряжения. Осуществлением параллельной работы секций шин НН расщепленных обмоток трансформатора через токоограничивающее устройство (ТОУ) (рис. 1г) достигается высокое качество напряжения в нормальном режиме и ограничение токов КЗ, при идеальных характеристиках ТОУ до уровня, присущего схеме на рис. 1в, т. е. в два раза.

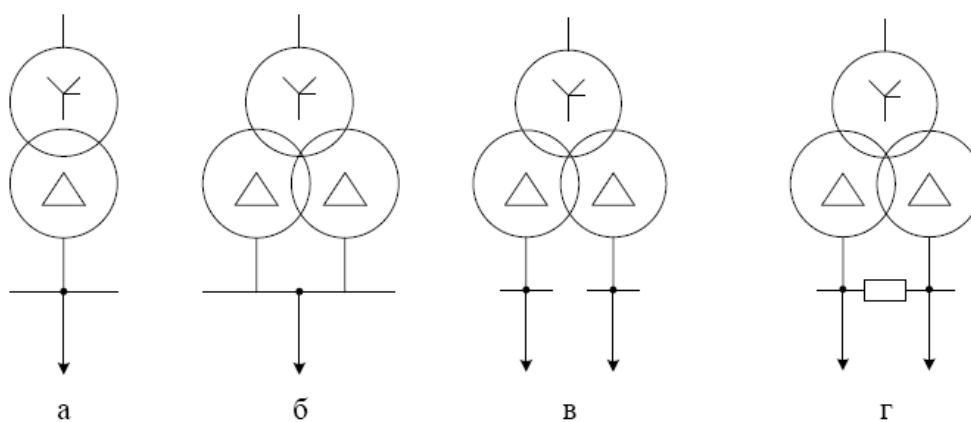


Рис. 1. Схемы систем электроснабжения с одной и двумя секциями сборных шин

В [3] описана новая схема построения системы электроснабжения (СЭ) с понижающим трансформатором, содержащая, как и схема на рис. 1г, две секции сборных шин и ТОУ, но обладающая лучшими характеристиками по уровням токов КЗ при обеспечении качества напряжения, присущего схемам на рис. 1а, б, г.

На рис.2 показана принципиальная схема СЭ с двухобмоточным понижающим трансформатором, обмотка НН которого замкнута в треугольник через ТОУ (группа соединений $Y/\Delta-11$). Она отличается двумя секциями сборных шин, к которым подключаются начала и концы обмотки трансформатора и разделённая, по возможности, поровну нагрузка (потребители типа Н-1 и Н-2).

В данной схеме возможно также подключение части нагрузки, включаемой на линейное напряжение, непосредственно к обмоткам трансформатора (потребители типа Н-3). Такими потребителями, как показано на рис. 2, могут быть трансформаторы 6-10/0,4 кВ, имеющие соединённые в треугольник обмотки ВН.

Нормальные режимы в данной системе электроснабжения не отличаются от обычных, поскольку ТОУ здесь обеспечивает параллельную работу секций сборных шин. Эффект глубокого ограничения аварийных токов при КЗ в распределительной сети (например, точка К1 на рис. 2) обусловлен резким увеличением сопротивления цепи с ТОУ, что вынуждает токи КЗ замыкаться через нагрузку неаварийной секции СЭ.

Технические науки

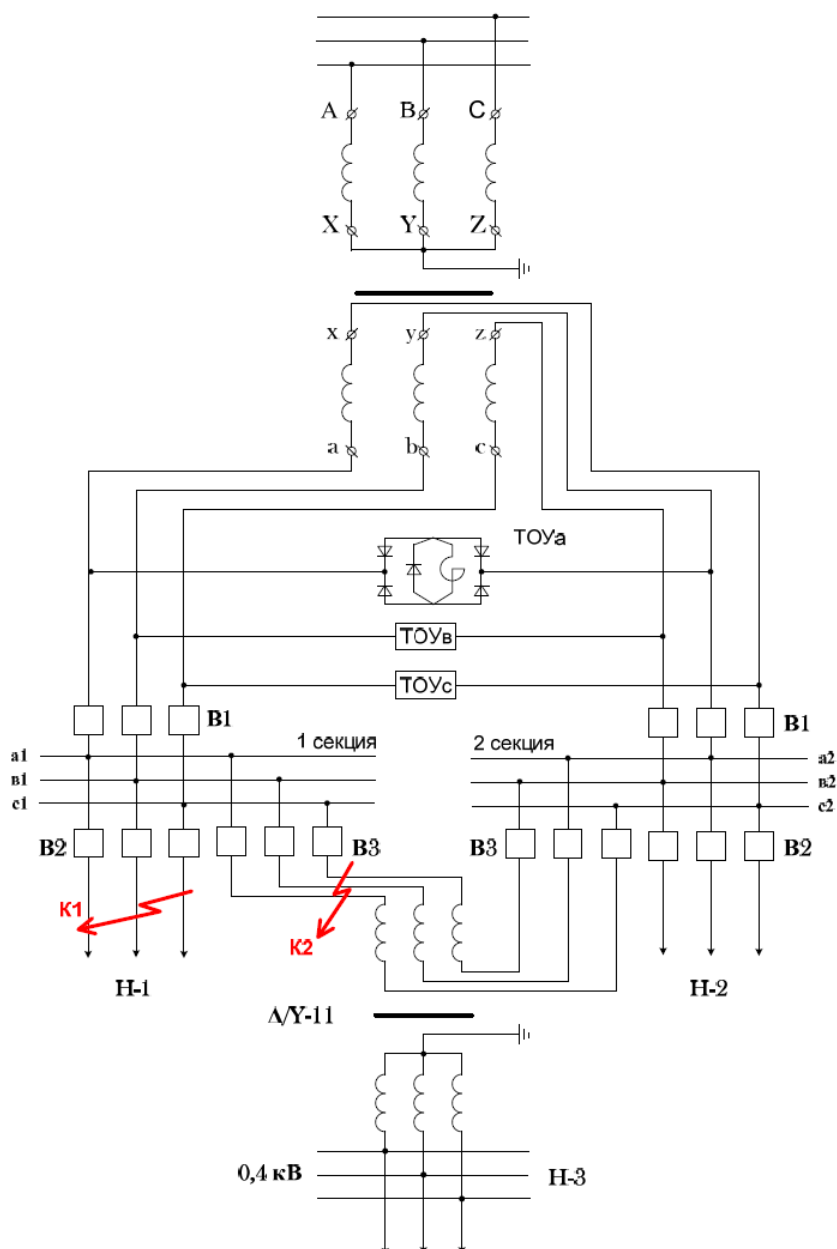


Рис. 2. Принципиальная схема системы электроснабжения со специальным подключением трансформатора с соединением обмоток в треугольник через две секции шин и ТОУ

В режиме КЗ в схеме срабатывание ТОУ с характеристикой, обеспечивающей разрыв соответствующих цепей, вызывает изменение схемы соединения обмоток трансформатора. Так, при трехфазном КЗ в точке К1 в цепь КЗ последовательно включаются фазные обмотки трансформатора с линейными напряжениями на их зажимах и большое сопротивление нагрузки Н-2 другой секции. Несмотря на увеличение в $\sqrt{3}$ раз ЭДС в цепи КЗ, аварийные токи при этом, как

показали исследования, не превышают 10% от токов КЗ в случае установки вместо ТОУ закороток, когда схема СЭ по своим свойствам становится эквивалентной схемам, представленным на рис. 1а, б. Однако столь глубокое ограничение тока КЗ на практике не всегда необходимое, сопровождается повышением в момент аварии напряжения на неаварийной секции почти в $\sqrt{3}$ раз. Поэтому целесообразно использование компромиссных решений, направленных на уменьшение перенапряжений и длительности существования аварийного режима.

При включении ТОУ непосредственно на выводах обмоток трансформатора и установке в цепи питания секций сборных шин быстродействующего вакуумного или тиристорного выключателя В1 (рис. 2) длительность существования аварийного режима может быть сокращена до одного периода промышленной частоты. Если при этом применить ТОУ, не полностью разрывающие цепь при КЗ и быстро восстанавливающие близкое к нулю сопротивление в послеаварийном режиме, то опасные перенапряжения на неаварийной секции будут отсутствовать, а после отключения аварийной секции выключателем немедленно восстановится нормальное питание неаварийной секции. Условия работы двух выключателей В1 в цепях питания секций являются облегченными. Принцип головного выключателя обеспечивает при этом предельно малые токи КЗ, отключаемые линейными выключателями В2. Эти выключатели могут быть заменены на выключатели нагрузки. После отключения выключателя В2 аварийной линии включается выключатель В1, восстанавливающий нормальный режим СЭ.

Схемы систем электроснабжения с тремя взаимосвязанными трехфазными подсистемами

Новая идея построения систем электроснабжения с малыми уровнями токов короткого замыкания (КЗ) предложена в [4]. Для ее реализации в энергосистеме следует выделить три находящихся в синхронизме источника питания, например, генераторы, трансформаторы или их отдельные группы, а для под-

ключения трехфазных электроприемников образуются три трехфазные подсистемы, фазы которых принадлежат к различным источникам питания. При получающемся в данном случае «перепутывании» фаз в подсистемах возникающие КЗ либо не сопровождаются ростом токов (сети с изолированной нейтралью 6–10 и 35 кВ), либо имеют только характер менее опасных однофазных замыканий (сети 0,4, 110 кВ и выше).

Схема на рис.3 иллюстрирует принцип построения такой СЭ. Она содержит три источника питания (ИП) и три подсистемы (ПС) с соответствующими нагрузками S_H . Фазы «А1», «В1» и «С1» в ПС1 соединены соответственно с фазой «А1» ИП1, фазой «В3» ИП3 и фазой «С2» ИП2. По такому же принципу присоединяются шины ПС2 и ПС3. Условно показано соединение фаз ИП в звезду. При рассмотрении режимов сети с глухозаземленной нейтралью ключ К замыкается.

При одинаковых трехфазных нагрузках подсистем имеем симметричные режимы с одинаковыми токами фаз во всех ИП и ПС. Неравномерность нагрузок ($S_{H1} \neq S_{H2} \neq S_{H3}$) вызывает нежелательную несимметрию токов ИП и напряжений на шинах ПС. Для устранения указанных негативных явлений можно в нормальном режиме соединить соответствующие фазы шин трех подсистем ПС с помощью токоограничивающих устройств (ТОУ) (показаны на рис.3 пунктиром), проходная мощность которых рассчитана только на относительно небольшие уравнивающие токи. Токоограничивающие устройства выравнивают загрузки ИП и обеспечивают высокое качество напряжения за счет их параллельной работы.

Рассмотрим для сети с заземленной нейтралью аварийный режим трехфазного короткого замыкания на землю на присоединении к шинам ПС1 за выключателем В. После срабатывания ТОУ и обесточивания тем самым всех связей шин ПС величины аварийных токов резко изменяются. Для каждого из ИП трехфазное КЗ переходит в однофазное, когда токи обычно снижаются, и имеется набор относительно недорогих мероприятий по их дополнительному

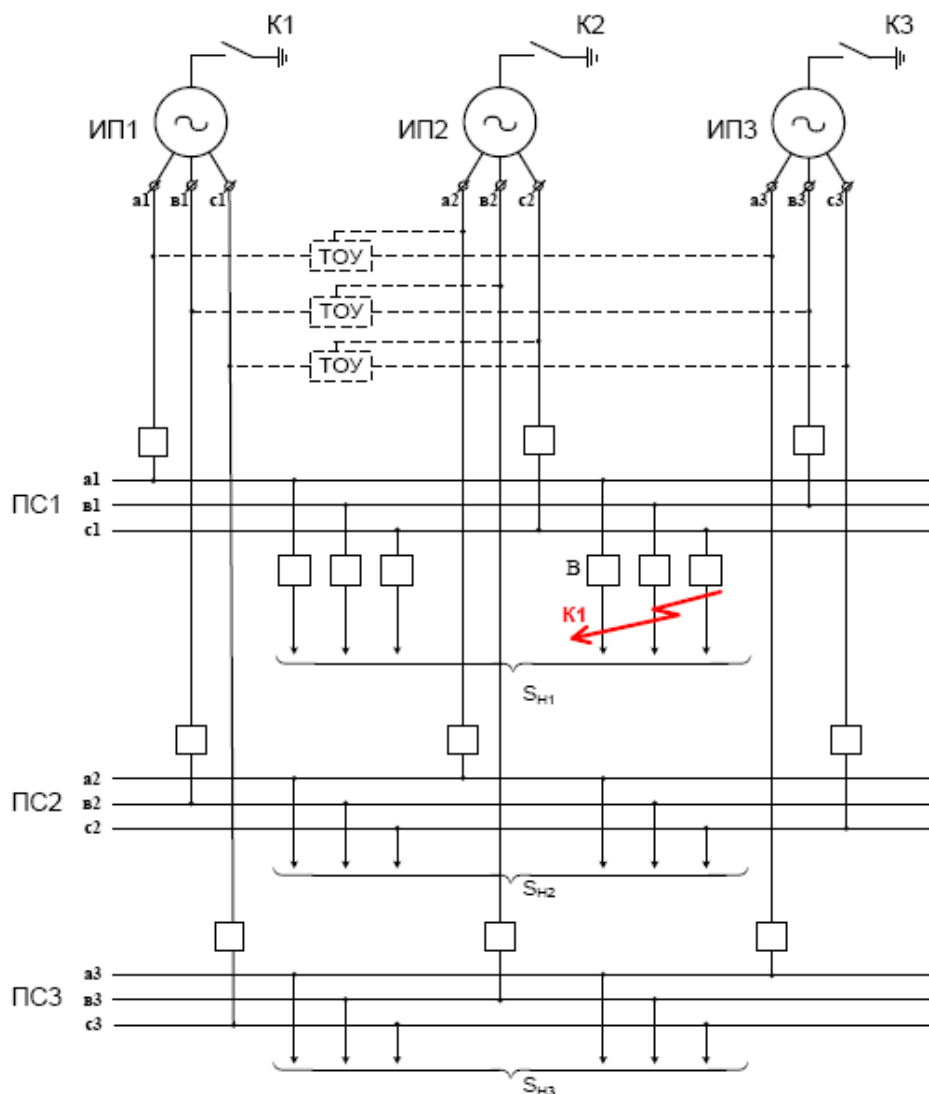


Рис. 3. Принципы построения системы электроснабжения с подсистемами

уменьшению за счет принудительного изменения сопротивления «нулевой» последовательности. На шинах неаварийных подсистем ПС2 и ПС3 при этом сохраняется близкое к номинальному напряжение на всех фазах. После ликвидации аварии (отключен выключатель В) восстанавливается напряжение на шинах ПС1, а после замыкания связей подсистем через ТОУ система возвращается в нормальное состояние.

В сети с изолированной нейтралью токи в месте КЗ после срабатывания ТОУ не превышают трехкратного номинального тока нагрузки одной подсистемы. Однако аварийных режимах будет увеличиваться напряжение на шинах

неаварийных ПС при сохранении его симметрии по фазам. Наибольшее повышение напряжения возникает при слабой нагрузке подсистемы, когда его величина достигает в пределе $\sqrt{3}U_{ном}$.

Таким образом, в СЭ по рис. 3 с тремя взаимосвязанными подсистемами удастся достичь сверхглубокого ограничения токов КЗ. Однако при наличии ТОУ в первый период существования КЗ до окончания процесса токоограничения наблюдаются повышенные уровни ударных токов КЗ из-за подпитки по цепям этих ТОУ. Это свойство, присущее всем типам СЭ с междушинными ТОУ, должно компенсироваться применением токоограничителей с улучшенными токоограничивающими характеристиками, например, на базе бесконтактной техники или быстродействующих предохранителей.

Приведем конкретные варианты реализации рассмотренной идеи построения системы распределения электрической энергии. Для этого необходимо иметь три примерно одинаковой мощности трехфазных источника, причем желательно, чтобы они представляли собой единый блок, поскольку при этом легче решаются вопросы обеспечения надежности и качества электроснабжения.

В СЭ с изолированной нейтралью, показанной на рис. 4, реализован данный принцип построения путем специального подключения трех трансформаторов к трем секциям сборных шин. Здесь может быть использован и один понижающий четырехобмоточный трансформатор с тремя расщепленными обмотками НН.

Обмотки НН трансформаторов могут быть соединены как в треугольник, так и в звезду, а ТОУ подключены непосредственно между секциями сборных шин, либо, как показано на рис. 3, до выключателей в цепи питания секций. Последнее предпочтительнее, поскольку позволяет при отключении одной из секций сохранить параллельную работу оставшихся электроприемников. В качестве ТОУ на три присоединения может быть, например, использовано реакторно-тиристорное устройство.

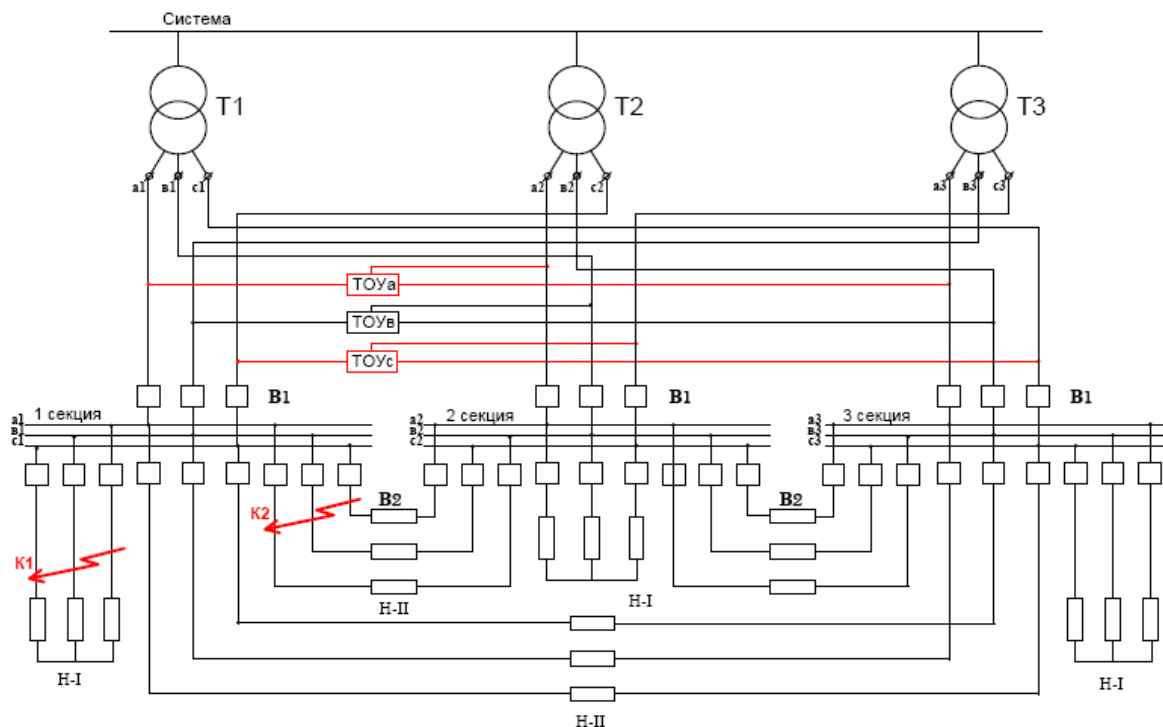


Рис. 4. Схема СЭ со специальным подключением трансформаторов к секциям сборных шин

Нагрузки в рассматриваемой СЭ могут подключаться, как обычно, к секциям сборных шин с возможно более точным распределением между ними с целью снижения перетока в нормальном режиме через ТОУ. Эти нагрузки на рис. 4 обозначены как Н-I. В СЭ с одинаковыми нагрузками секций в использовании ТОУ нет необходимости. Может быть также применен принцип подключения некоторых трехфазных электроприемников (понижающих трансформаторов, двигателей) двумя трехфазными линиями непосредственно на линейное напряжение питающих трансформаторов (нагрузки Н-II). Нетрудно убедиться, что на этих нагрузках в течение всего процесса КЗ на любой из секций шин (точки К1 и К2) будет сохраняться практически номинальное напряжение.

Гексагональные схемы городских распределительных сетей

Новое направление развития электрических сетей – интеллектуальные сети (Smart Grid), направлено на модернизацию всей отрасли электроэнергетики.

Концепция «Smart Grid» предусматривает следующие основные задачи:

– обеспечение и повышение надежности распределительной сети;

– автоматическое управление элементами сети по адаптивным алгоритмам;

– управление режимами сети и локализация повреждений.

Единая технологическая и информационная платформа позволяет перейти от жесткой радиально-магистрально архитектуры сети к более гибкой равномерно распределенной сети, которая является адаптивной, при этом каждый узел сети является активным элементом, позволяющим производить переконфигурацию сети в соответствии с оптимальным режимом работы. Примером такой сети является гексагональная распределительная сеть, описанная в [5] (рис. 5).

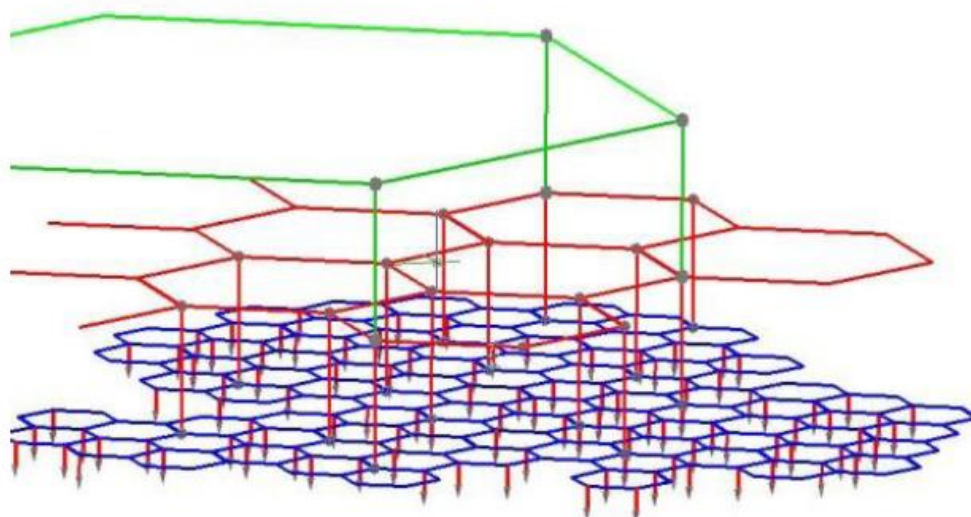


Рис. 5. Структура гексагональной распределительной сети различных уровней напряжения

Равномерно-распределенная электрическая сеть гексагонального типа позволяет реализовать концепцию гибких распределительных сетей.

Гексагональная сеть – это совокупность территориально равномерно-распределенных узлов нагрузки, соединенных между собой проводниками одинакового сечения и имеющая топологию в виде правильных шестиугольников (сотовая конфигурация электрической сети).

Гексагональные сети позволяют перейти к четкой системной конфигурации сети, в которой все кабельные линии между РП находятся в работе, а сами РП питаются по трем линиям. Это позволяет сделать сеть более гибкой к ведению режима и увеличить надежность электроснабжения потребителей. Каждый узел в гексагональной сети является универсальным (рис.6), а, следовательно, алгоритмы управления таких узлов универсальны.

Переход к гексагональным сетям ведет к параллельной работе источников питания, что может привести к увеличению токов короткого замыкания в узлах нагрузки. Для некоторых устройств это недопустимо по динамической устойчивости. Переход от единой сети к сети, состоящей из отдельных зон (рис. 7), позволяет снизить уровень токов короткого замыкания. Такой подход делает сеть гибкой и устойчивой в различных режимах работы, включая аварийные.

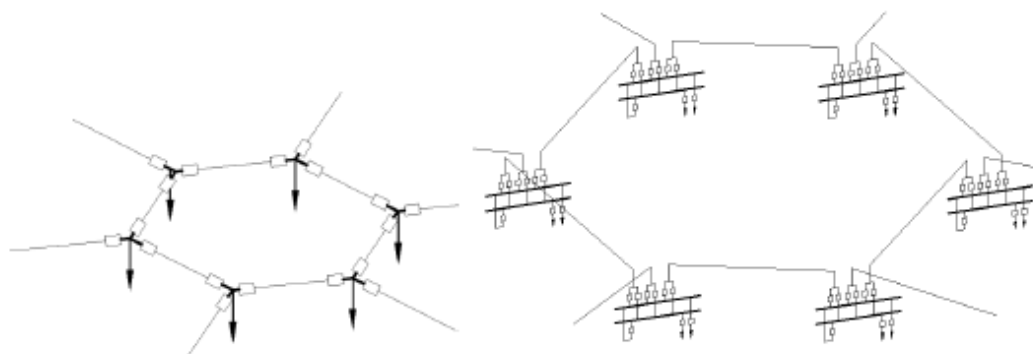


Рис. 6. Ячейка гексагональной сети с распределительным устройством в узлах нагрузки

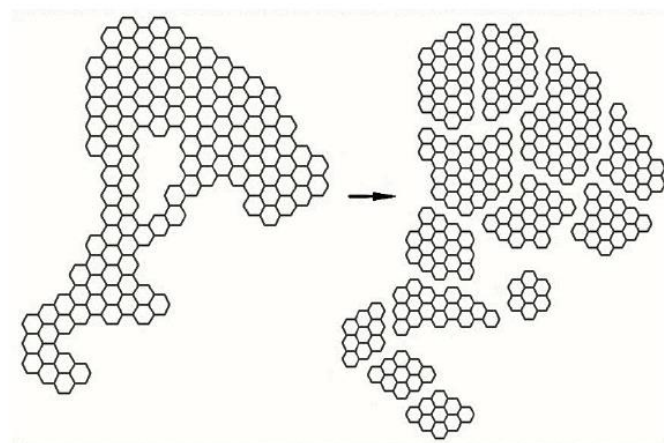


Рис. 7. Представление единой сети, состоящей из отдельных зон

Уменьшение единичной мощности питающих узлов и использование одного понижающего трансформатора 110/10 (20) кВ уменьшает риск распространения аварий при повреждениях. Также в отдельных зонах можно более точно учитывать уровень загрузки района, а уменьшение шага сети повышает ее гибкость.

Гексагональная распределительная сеть, в узлах которой предполагаются интеллектуальные цифровые подстанции, имеет четкие алгоритмы управления, а общее корпоративное информационное пространство, которое используется электросетевой компанией для целей управления, защит, мониторинга, позволит сделать сеть очень гибкой, значительно повысит качество и надежность электроснабжения потребителей.

Гексагональные распределительные сети позволят реализовать автоматическое управление распределением и потреблением электроэнергии, сделать сеть гибкой, вывести энергетику распределительных сетей на новый уровень, соответствующий современным мировым стандартам и запросам потребителей. Реализация гексагональных сетей возможна только с использованием оборудования узлов нагрузки с цифровым управлением.

Таким образом, рациональное применение различных видов сетей с учетом их достоинств и недостатков позволит увеличить надежность городских электрических сетей, при этом не увеличивая значительно затраты на резервирование различных элементов.

Список литературы

1. *Козлов В. А.* Городские распределительные электрические сети. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. 224 с.: ил.
2. *Миловидов С. С.* Надежность городских кабельных сетей. Выбор рациональных схемных решений // *Новости ЭлектроТехники*. 2011. № 2(68). С. 50–52.
3. *Веселов А. Е., Ярошевич В. В., Токарева Е. А., Фастий Г. П.* Системы электроснабжения с видоизмененными схемами соединения в треугольник обмоток понижающих трансформаторов // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2011. № 5. С. 178–188.

4. *Веселов А. Е., Ярошевич В. В., Токарева Е. А., Фастий Г. П.* Схемы и основные свойства систем электроснабжения с тремя взаимосвязанными трехфазными подсистемами // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. № 1. С. 52–60.
5. *Лоскутов А. Б., Соснина Е. Н., Лоскутов А. А., Зырин Д. В.* Городские распределительные сети 10–20 кВ с гексагональной конфигурацией // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. 2013. № 5(102). С. 309–315.
6. *Козлов В. А.* Электроснабжение городов. Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. 264 с.: ил.
7. *Файбисович Д. Л.* Каким быть номинальному напряжению в распределительных сетях? // Новости ЭлектроТехники. 2003. № 4(22). С. 50–52.
8. *Буре И. Г.* Повышение напряжения до 20–25 кВ и качество электроэнергии в распределительных сетях // Электро. 2005. № 4. С. 30–32.
9. *Плетнев Л. А.* Электросеть для мегаполиса // Новости электротехники: информ.-справ. изд. 2004. № 3 (27). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2004/27/09> (дата обращения: 23.10.2014).
10. *Асташев Д. С., Бедретдинов Р. Ш., Кисель Д. А., Соснина Е. Н.* Применение напряжения 20 кВ для распределительных электрических сетей России // Вестник НГИЭИ. 2015. № 4 (47). С. 6–9.

МИНИН Никита Сергеевич – магистрант группы ЭиЭ 1801-01, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: bezposhar@gmail.com

ОЖЕГОВ Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: ano.kirov@gmail.com

ЗАКАЛАТА Александр Алексеевич – доцент кафедры электроснабжения, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: usr00134@vyatsu.ru