УДК 621.316.1
Шифр специальности ВАК 2.4.3.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 20 КВ МЕГАПОЛИСА

Рассмотрены вопросы технологического проектирования электрических сетей 20 кВ мегаполиса. Показаны особенности компоновки сетей с резистивным заземлением нейтрали и связанные с этим вопросы технологического проектирования и обеспечения надежности электроснабжения потребителей. Рассмотрены варианты схемных решений. Рассмотрено влияние повышенных значений емкостных токов, возникающих при развитии электрической сети, на термическую устойчивость оборудования и организацию релейной защиты.

АВТОРЫ:

М.Ю. Львов, д. т. н.,
lvovmy@uneco.ru

А.А. Челазнов, д. т. н.,
А.С. Долгов,
С.С. Зотов,
АО «ОЭК»

Введение

Номинальные напряжения городских электрических сетей в СССР и далее, уже в России, устанавливались соответствующими стандартами. Исторически в сетях среднего напряжения для городских электрических сетей получили распространение напряжения 6 и 10 кВ. При этом внедрение напряжения 10 кВ в ряде городов было осуществлено еще в 30-х годах прошлого века.

Первоначально в большинстве городов широкое распространение получило развитие электрических сетей напряжением 6 кВ, что было связано с использованием данного класса напряжения в системах электроснабжения промышленных

Вечерний мегаполис. Источник: Freepik

Ключевые слова: #технологическое проектирование; #электрические сети 20 кВ; #мегаполис; #надежность электроснабжения.

предприятий, от подстанций которых питались потребители городских сетей. Использование напряжения 6 кВ на промышленных предприятиях определялось отсутствием электродвигателей 10 кВ, при этом построение сети напряжением 6 кВ позволяло обеспечить приемлемую схему электроснабжения с учетом существующих нагрузок [1].

В конце 50-х годов прошлого века в СССР в Правила устройства электроустановок были внесены требования о необходимости построения городских электрических сетей среднего напряжения на номинальное напряжение 10 кВ. В дальнейшем Всесоюзным институтом электроэнергетики (ВНИИЭ) были разработаны рекомендации по переводу действующих электрических сетей напряжением 6 кВ на номинальное напряжение 10 кВ. Вместе с тем следует отметить, что в настоящее время в мегаполисах России эксплуатируется значительное количество электрических сетей напряжением 6 кВ.

В ГОСТ 721-77 «Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии», введенный в 1978 г., для среднего напряжения были установлены следующие классы напряжения: 6, 10, 20, 35 кВ. При этом в данном ГОСТ указывалось, что номинальное напряжение 6 кВ для вновь проектируемых сетей не рекомендуется. В качестве основного напряжения для городских электрических сетей среднего напряжения в СССР было принято напряжение 10 кВ.

В Указаниях по проектированию городских электрических сетей ВСН 97-75, утвержденных Минэнерго СССР в 1975 г., указывалось, что для большинства городов наиболее целесообразной на ближайший период является система напряжений 110/10/0,4 кВ, а для крупнейших и крупных городов на перспективу следует рассматривать переход на систему 220/10–20/0,4 кВ. Также указывалось, что использование напряжения 20 кВ в городских электрических сетях может быть экономически оправдано при наличии соответствующего оборудования и кабелей, стоимость которых не превышает более чем на 20–30 % стоимость оборудования и кабелей на напряжение 10 кВ.

В Инструкции по проектированию городских и поселковых электрических сетей ВСН 97-83, утвержденной Минэнерго СССР в 1983 г., указывалось, что выбор класса напряжения системы электроснабжения города и поселка должен производиться с учетом сокращения количества трансформаций энергии и ликвидации напряжений 6 и 35 кВ с переводом действующих сетей 6 и 35 кВ на повышенное напряжение 10 и 110 кВ. При этом указывалось, что целесообразность применения электрических сетей напряжением 20 кВ требует технико-экономического обоснования. Также указывалось, что городские электрические сети напряжением 10–35 кВ должны выполняться трехфазными с изолированной или заземленной через дугогасящие реакторы нейтралью.

В 1994 г. Министерством топлива и энергетики Российской Федерации и РАО «ЕЭС России» была утверждена Инструкция по проектированию городских электрических сетей [2]. В соответствии с требованиями указанного документа городские электрические сети должны выполняться комплексно, с увязкой между собой электроснабжающих сетей 35 кВ и выше и распределительных сетей 6–20 кВ, с учетом всех потребителей города и прилегающих к нему районов. Электрические сети должны выполняться с учетом обеспечения наибольшей экономичности, требуемой надежности электроснабжения, соблюдения установленных норм качества электроэнергии. Напряжение системы электроснабжения города должно выбираться с учетом наименьшего количества ступеней трансформации энергии. При этом указывается, что для большинства городов на ближайший период развития города наиболее целесообразной является система напряжений 35–110/10 кВ; для крупнейших и крупных городов — 500/220–110/10 кВ или 330/110/10 кВ, при этом в крупнейших и крупных городах использование напряжения 35 кВ должно быть ограничено.

В данном документе также отмечается, что в новых районах застройки напряжение распределительных сетей выше 1 кВ должно приниматься не ниже 10 кВ независимо от напряжения сети в существующей части города. При этом применение напряжения 20 кВ в городских распределительных сетях рекомендуется рассматривать при реконструкции или расширении действующих сетей этого класса напряжения. Целесообразность применения сетей этого класса напряжения должна быть технико-экономически обоснована.

Анализ развития нормативно-технической документации в нашей стране в части выбора номинального напряжения для городских электрических сетей в период до 2000 г. показывает, что, начиная с конца 60-х годов, в директивных документах рассматривалась при определенных условиях возможность применения напряжения 20 кВ для построения городских электрических сетей. Вместе с тем строительство городских электрических сетей 20 кВ не происходило.

Электрические сети напряжением 20 кВ в России начали развиваться в г. Москве с 2001 года со строительством ПС 110/20 кВ «Сити-1», предусмотренной для электроснабжения Московского международного делового центра «Москва-Сити». В 2004 году был реализован проект электроснабжения застройки Ходынского поля,

который фактически явился первым в России участком городской электрической сети напряжением 20 кВ [3]. Развитие электрической сети 20 кВ в г. Москве вызвано увеличением концентрированной мощности инженерных сооружений до 15–30 МВт в рамках одного объекта. Возможности сетей 6–10 кВ для обеспечения таких мощностей практически исчерпаны, попытки реализации проектов энергоснабжения на этих напряжениях приводят к повышенной плотности сети и невозможности организации селективной работы релейной защиты. Поэтому технически и экономически обоснованным является применение и развитие электрической сети напряжением 20 кВ [3, 4, 5]. В настоящее время в г. Москве эксплуатируется 3,5 тыс. км электрических сетей напряжением 20 кВ.

Технологические особенности электрической сети напряжением 20 кВ мегаполиса

Внедрение в городских электрических сетях напряжения 20 кВ, в отличие от напряжения 10 кВ, позволяет:

- увеличить пропускную способность сети в 2 раза;
- снизить потери электрической энергии в сети;
- улучшить качество напряжения у потребителей;
- увеличить экономический радиус технологического присоединения потребителей;
- уменьшить количество вновь вводимых кабельных линий.

Следует отметить, что оборудование электрической сети 20 кВ выполняется практически в габаритах сети 10 кВ, а эксплуатация не сопровождается дополнительными повышенными требованиями. Следует также отметить особенности электрической сети напряжением 20 кВ в г. Москве, а именно:

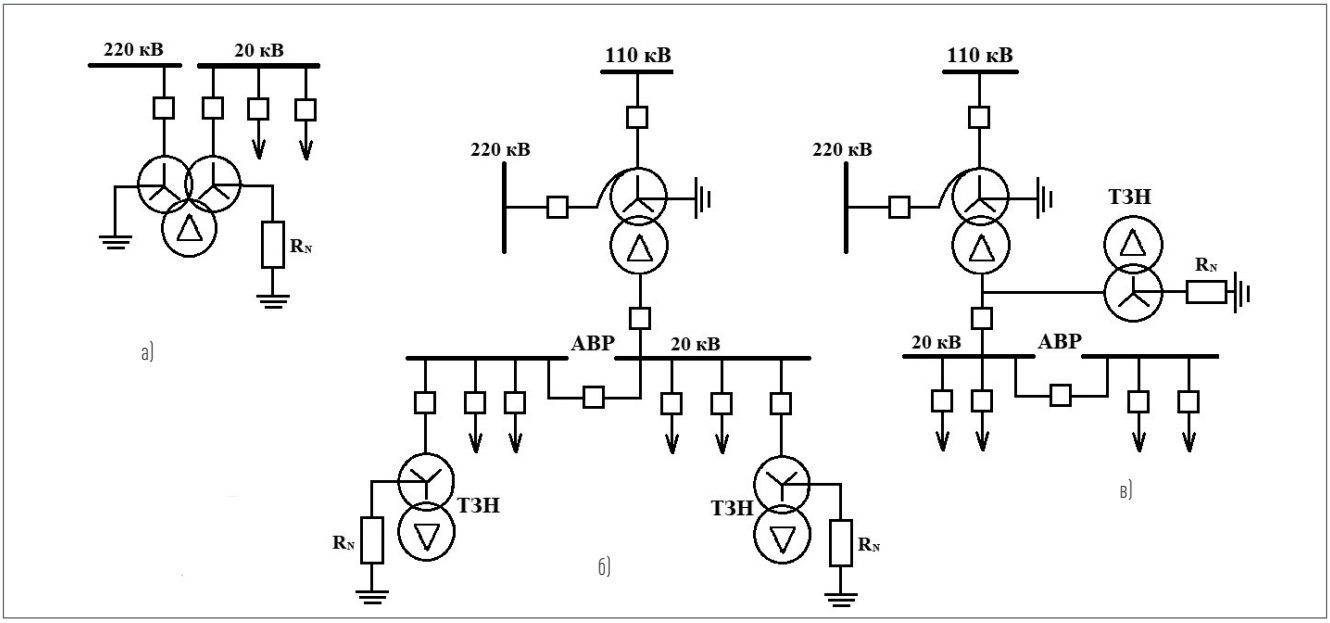
- кабельная сеть выполняется одножильными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена;
- электрическая сеть выполнена по принципу резистивного заземления нейтрали с действием устройств релейной защиты на отключение поврежденных линий при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ).

Применение резистивного заземления нейтрали сети, в отличие от сети с изолированной или компенсированной нейтралью, позволяет:

- обеспечить автоматическое отключение линии при возникновении ОЗЗ;
- существенно снизить риск возникновения междуфазных замыканий;
- повысить электробезопасность при эксплуатации электрической сети за счет автоматического отключения кабельной линии при возникновении ОЗЗ;
- увеличить сроки службы кабелей и оборудования за счет исключения дуговых перенапряжений при ОЗЗ;
- исключить возникновение феррорезонансных перенапряжений в электрической сети;
- сократить время поиска повреждения кабельной линии.

СХЕМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ СЕТИ 20 КВ

Рис. 1



Технологическое проектирование электрических сетей напряжением 20 кВ должно учитывать современные требования к обеспечению надежности потребителей мегаполиса, особенности развития электрических сетей данного класса напряжения в условиях существующей инфраструктуры, значительных единичных мощностей современных инженерных сооружений, присоединяемых к городским распределительным сетям, а также особенности режима низкоомного заземления нейтрали с учетом накопленного опыта проектирования и эксплуатации.

В г. Москве резистивное заземление нейтрали электрической сети 20 кВ выполняется с применением резистора сопротивлением 12 Ом, обеспечивающего при ОЗЗ ток 1000 А. Применяется схема, в которой резистор включается в нейтраль обмотки 20 кВ силового трансформатора, соединенной по схеме «звезда с нулем» (рис. 1 а) [6]. При условии соблюдения требований по фазировке сети возможно применение схем включения резистора в нейтраль обмотки 20 кВ дополнительно устанавливаемого трансформатора заземления нейтрали ТЗН (рис. 1 б, в).

При соблюдении требований по селективности работы релейной защиты значение сопротивления резистора в нейтрали может принимать другие значения. В этом случае значение резистора выбирается по условиям электробезопасности, термической устойчивости экранов кабелей, термической устойчивости резистора и электрооборудования.

При работе электрической сети напряжением 20 кВ в режиме низкоомного резистивного заземления нейтрали с сопротивлением 12 Ом ОЗЗ отключается за время, не превышающее $t_{от}$ = 1÷2 с.

Для резистивного заземления нейтрали на всех присоединениях секции шин 20 кВ используется максимальная токовая защита от ОЗЗ с действием на отключение. При отказе защиты поврежденного присоединения осуществляется резервное действие защиты на отключение ввода, питающего секцию шин, с целью защиты резистора от термического повреждения и предотвращения длительной работы сети в режиме ОЗЗ с большим током повреждения.

Защита элементов резистора от ОЗЗ осуществляется дифференциальной либо токовой защитой нулевой последовательности. При повреждении на элементах резистора защита действует на отключение питающего трансформатора. Защита шин и присоединения резистора от замыканий на землю обеспечивает отключение питающего ввода при внутреннем ОЗЗ, а также резервирование в случаях отказа выключателей или защит отходящих присоединений.

Схема питающей сети 20 кВ построена как с применением распределительных пунктов (РП) аналогично схеме электрических сетей напряжением 10 кВ, так и по принципу магистрали с отбором мощности от двух центров питания (ЦП). Питание РП выполняется от двух независимых, территориально разнесенных ЦП по двум независимым (взаиморезервируемым) кабельным линиям.

Разновидностью является применение вместо РП соединительных пунктов (СП) по схеме двухцепной магистрали между двумя центрами питания с отбором мощности посредством заходов в СП 20 кВ (в отдельных случаях СП подключены к магистрали между РП).

На первом этапе построение опорной сети 20 кВ производилось с применением вместо РП соединительных пунктов на выключателях нагрузки полной заводской готовности блочного изготовления. Через СП магистрали напряжением 20 кВ образуют кольцо по периферии застройки, между СП включаются цепочки трансформаторных подстанций (ТП) распределительной сети, выполненной одножильными кабелями. В каждой цепочке до восьми ТП с двумя трансформаторами.

Сложность прокладки новых кабельных линий в условиях плотной застройки мегаполиса обусловила применение промежуточных выносных СП, от которых кабельные линии подводятся к питающим нагрузку ТП. Применение при построении сети 20 кВ СП, имеющих в своем составе ячейки с выключателями нагрузки, позволило снизить в РП уставки токовых защит по времени и уменьшить электродинамическое воздействие токов КЗ на силовое оборудование. Однако при этом решении невозможно быстро определить место повреждения. Поиск и вывод в ремонт аварийного участка КЛ осуществляется со значительными затратами времени в связи с большим числом переключений.

Применение схемы с использованием РП позволяет при замыкании на землю на отходящей линии аварийно отключать только поврежденное направление, а не секцию целиком, как в случае СП. Также схема позволяет снизить количество аварийных отключений за счет схем автоматики включения резерва, уменьшить количество обесточенных потребителей и уменьшить время обесточения за счет настройки селективности защит терминалов и отключения только поврежденного направления.

Следует также отметить, что в существующей сети 20 кВ, построенной для энергоснабжения района Сколково, применено решение с использованием головного соединительного пункта (ГСП) [4]. На ГСП установлены вводные выключатели с устройствами релейной защиты для уменьшения частоты срабатывания выключателей, установленных на фидерах, отходящих

от центра питания. Остальные присоединения выполняются на выключателях нагрузки. Подобное построение сети выступает как альтернатива вариантам построения электрической сети на основе соединительных пунктов, имеющих в составе ячейки с выключателями нагрузки и питающихся напрямую от ЦП, или решения по построению электрической сети, когда от ЦП отходят питающие линии на РП, имеющие в своем составе силовые выключатели с комплектами релейной защиты, а от РП отходят линии на СП.

При развитии электрической сети 20 кВ для повышения удобства переключений и снижения объема аварийно отключаемой нагрузки происходит отказ от применения СП с прямым подключением КЛ потребителей к РП.

При проектировании электрических сетей напряжением 20 кВ в мегаполисе должны предъявляться следующие требования:

- обеспечение необходимой надежности электроснабжения потребителей;
- максимальная унификация применяемых схем и оборудования;
- блочная конструкция распределительных трансформаторных подстанций;
- оснащение сети быстродействующими защитами;
- применение выключателей с минимальным собственным временем отключения/включения, отключением однофазных замыканий и применением быстродействующих устройств АВР;
- применение комплектных распределительных устройств (КРУ);
- использование кабеля из сшитого полиэтилена;
- оснащение распределительных пунктов и трансформаторных подстанций оборудованием телеуправления, телеизмерения, телесигнализации и АИИС КУЭ.

Развитие электрической сети напряжением 20 кВ с резистивным заземлением нейтрали требует согласованного построения надежных и эффективных систем защит и автоматики.

В настоящее время в части защиты и автоматики электрической сети 20 кВ с резистивным заземлением нейтрали используются наиболее простые системы, представляющие собой последовательность ступенчатых токовых защит по аналогии с ранее построенными сетями 6–10 кВ с изолированной нейтралью. Эксплуатация сети 20 кВ мегаполиса с режимом резистивного заземления нейтрали обусловливает отключение поврежденных линий при возникновении однофазного замыкания на землю.

Отключение любого поврежденного элемента электрической сети 20 кВ мегаполиса (линий, подстанционного оборудования ЦП и оборудования РП, ТП, РТП, шин, трансформаторов, реакторов и другого первичного оборудования) должно осуществляться с минимально возможным временем в целях сохранения устойчивой бесперебойной работы неповрежденной части системы и ограничения области и степени повреждения. Защита от однофазных замыканий на землю выполняется, как правило, с использованием трансформаторов тока нулевой последовательности. Для кабельной сети 20 кВ мегаполиса должны применяться устройства защиты и автоматики, позволяющие селективно отключать поврежденный участок кабельной сети, не отключая другие участки сети или с автоматикой самовосстановления неповрежденных участков.

На каждой секции шин 20 кВ необходимо предусматривать:

- логическую защиту шин, обеспечивающую правильную работу при всех возможных режимах работы первичной сети;
- оптическую дуговую защиту, охватывающую все присоединения защищаемой секции;
- суммарную токовую защиту для резервирования защит отходящих питающих линий.

На секционном выключателе 20 кВ необходимо предусматривать:

- максимальную токовую защиту от межфазных коротких замыканий;
- токовую защиту нулевой последовательности от замыканий на землю;
- оптическую защиту от дуговых замыканий;
- логическую защиту шин;
- суммарную токовую защиту;
- устройство резервирования отказа выключателя (УРОВ);
- логику пуска АВР и восстановления нормальной схемы после работы АВР.

На вводных выключателях необходимо предусматривать:

- максимальную токовую защиту от междуфазных КЗ;
- токовую защиту нулевой последовательности от замыканий на землю;
- защиты от несимметричного режима и обрыва фаз;
- суммарную токовую защиту;
- логическую защиту шин;
- оптическую защиту от дуговых замыканий;
- устройство резервирования при отказе выключателя;
- логику пуска АВР и восстановления нормальной схемы после работы АВР.

На КЛ 20 кВ должны быть предусмотрены устройства релейной защиты от многофазных коротких замыканий и однофазных замыканий на землю. Для увеличения надежности электроснабжения потребителей на питающих линиях от ЦП до РП, РТП должна быть предусмотрена установка

продольных дифференциальных защит линий (ДЗЛ) [7].

В составе терминала ДЗЛ помимо основной быстродействующей защиты должны быть предусмотрены функции:

- токовой отсечки;
- максимальной токовой защиты от межфазных коротких замыканий;
- токовой защиты нулевой последовательности от замыканий на землю;
- защиты от перегрузки с действием на сигнал;
- устройства резервирования при отказе выключателя;
- защиты от несимметричного режима и обрыва фаз.

Дополнительно в ячейке присоединения защищаемой КЛ 20 кВ должна быть предусмотрена оптическая дуговая защита.

Если на КЛ 20 кВ возможен обратный переток мощности, ступенчатые защиты при необходимости выполняются направленными.

На силовых трансформаторах 20/0,4 кВ необходимо предусматривать:

- токовую отсечку;
- максимальную токовую защиту от межфазных КЗ;
- токовую защиту нулевой последовательности от замыканий на землю;
- защиту от перегрузки;
- технологическую защиту от повышения температуры (для сухих трансформаторов);
- устройство резервирования при отказе выключателя.

На трансформаторах РТП 20/0,4 кВ должна дополнительно предусматриваться продольная дифференциальная токовая защита. В ячейке присоединения должна быть предусмотрена оптическая дуговая защита.

АВР должен предусматриваться для восстановления питания потребителей путем автоматического присоединения резервного источника питания при отключении рабочего источника питания, приводящего к обесточиванию электроустановок потребителей. Устройство АВР должно действовать при исчезновении напряжения на шинах питаемого элемента. Действие устройств АВР следует блокировать в случаях:

- отключения рабочего питания при КЗ, или при однофазном замыкании на землю на шинах питаемого элемента, или при действии УРОВ, отходящих от данных шин присоединений;
- воздействия на включение потребителей, отключенных устройствами противоаварийной автоматики.

Устройство АВР на шинах 20 кВ ЦП должно быть организовано с функцией восстановления.

Одним из способов повышения быстродействия надежности защиты элементов распределительной сети мегаполиса является использование защит с абсолютной селективностью [7]. При этом на электрических присоединениях организовываются дифференциальные защиты, играющие роль основных, а функции резервных переходят к ступенчатым защитам. Применение дифференциальных защит в электрической сети мегаполиса позволяет увеличить быстродействие определения и отключения повреждения в сети и расширить максимально допустимое количество независимых селективных зон действия системы защиты и автоматики.

Главным приоритетом в работе электрической сети мегаполиса является обеспечение надежного, безопасного, бесперебойного электроснабжения потребителей города. Схемы электрической сети 20 кВ мегаполиса должны обеспечивать минимальное время восстановления электроснабжения потребителей при возникновении аварийных режимов и технологических нарушений в электрической сети.

В целях повышения надежности электрической сети 20 кВ мегаполиса при проектировании следует предусматривать выполнение критерия надежности энергоснабжения потребителей N-1 в нормальной и ремонтной схемах [8].

В нормальной схеме путем:

а) применения схем двухстороннего питания РП, РТП, ТП;
б) секционирования РУ 20 кВ в центрах питания;
в) секционирования РУ 20 кВ и РУ 0,4 кВ в РП, РТП, ТП.

В ремонтной схеме путем:

а) резервирования магистральных КЛ;
б) применения двухтрансформаторных ТП, РТП с полным резервированием трансформаторов 20/0,4 кВ по мощности.

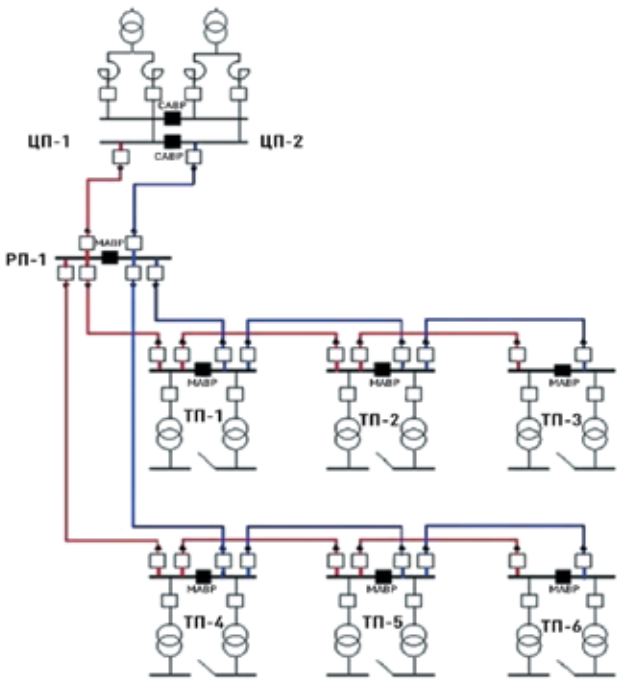
В электрической сети 20 кВ мегаполиса для обеспечения надежного электроснабжения потребителей следует рассматривать применение схемы двухстороннего питания РП от двух центров питания (разных ПС), позволяющей не допускать прекращения электроснабжения при отключении всех силовых трансформаторов на одном ПЦ. При этом необходимо также рассматривать подключение ТП от двух независимых источников питания, что достигается наличием кабельных линий от разных РП.

Для обеспечения надежного электроснабжения в электрической сети 20 кВ следует применять два вида автоматического включения резерва (АВР):

- сетевой АВР в пункте АВР, соединяющем две ЛЭП, отходящие

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ОТ ОДНОЙ ПИТАЮЩЕЙ ПОДСТАНЦИИ (РАДИАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ)

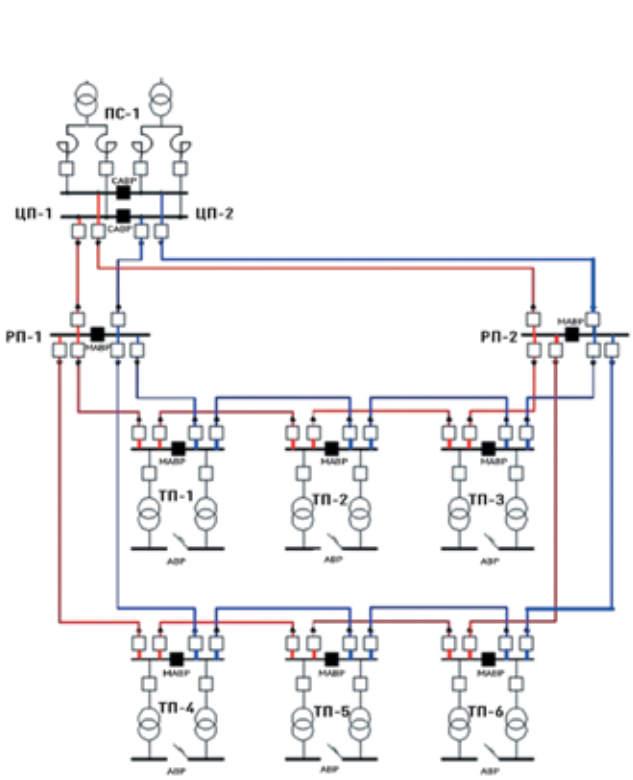
Рис. 2



Примечание. На данной схеме и последующих схемах приняты следующие условные обозначения:
□ – нормально включенный автоматический выключатель;
■ – нормально отключенный автоматический выключатель;
⎯⎯ – коммутационный аппарат.

СХЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОТ ОДНОЙ ПИТАЮЩЕЙ ПОДСТАНЦИИ С ПОСТРОЕНИЕМ ДВУХ РП

Рис. 3



от разных ПС либо от различных секций шин РУ 20 кВ одной ПС;
– местный АВР для включения резервного ввода на шины 20 кВ ТП или РП после исчезновения напряжения на рабочем вводе и его отключения.

Для ответственных потребителей необходимо устанавливать устройства АВР непосредственно на вводе 20 кВ и на вводе 0,4 кВ.

Электроснабжение РП должно, как правило, осуществляться от ЦП разных ПС. При электроснабжении РП от одной ПС питающие линии 20 кВ должны быть подключены к разным секциям шин ПС, подключенным к разным силовым трансформаторам. Однако в этом случае необходимо принимать во внимание, что отключение силовых трансформаторов на ПС приведет к прекращению электроснабжения потребителей.

Подключение РП и РТП 20 кВ от ЦП разных ПС, а также от ЦП одной ПС, но от разных силовых трансформаторов должно осуществляться по двухлучевой схеме. При этом в случае одностороннего питания отдельных шин ТП АВР осуществляется на стороне 0,4 кВ, а при двухстороннем питании отдельных шин ТП АВР реализуется на стороне 20 кВ. Питающие сети напряжением 20 кВ должны выполняться с применением двухсекционных РП с АВР на секционном выключателе 20 кВ и питанием РП от двух независимых ЦП, по двум независимым (взаиморезервируемым) кабельным линиям.

Схемные решения электрической сети 20 кВ мегаполиса

Обеспечение надежности электроснабжения потребителей во многом определяется схемными решениями, определяемыми при технологическом проектировании [8].

На рисунке 2 приведена схема электроснабжения от одной питающей ПС (радиальная схема). Отдельные цепочки магистрали выделены различным цветом.

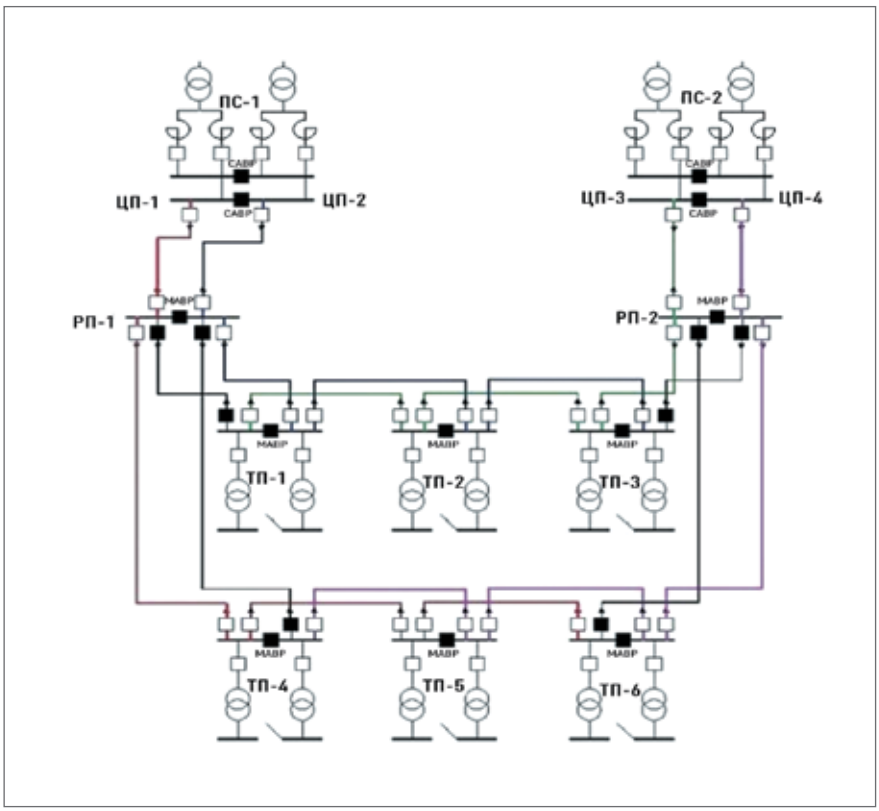
Основным недостатком данной схемы является ее относительно низкая надежность, т. к. аварийное отключение элемента в сети 20 кВ приводит к перерыву электроснабжения на время действия АВР. При этом отключение двух трансформаторов на ПС приводит к прекращению электроснабжения потребителей.

На рисунке 3 приведена схема электроснабжения от одной питающей ПС с построением двух РП.

В данной схеме каждый РП связан с ЦП через разные секции шин. Каждая из двух цепочек магистрали 20 кВ представляет собой замкнутую кольцевую схему через два РП. При выводе в ремонт элемента магистрали сети 20 кВ конфигурация сети частично преобразуется в радиальную. Аварийное отключение силового трансформатора на ПС приводит к срабатыванию АВР на стороне 20 кВ ЦП.

СХЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОТ ДВУХ ПИТАЮЩИХ ПОДСТАНЦИЙ (РАДИАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ)

Рис. 4



Аварийное отключение силового трансформатора в ТП приводит к срабатыванию АВР на стороне 0,4 кВ ТП с переводом электроснабжения на оставшийся в работе трансформатор. Установка АВР на стороне 20 кВ в ТП не требуется в случае применения в данной схеме дифференциальной защиты КЛ с выделением аварийного участка и сохранением питания шин ТП. Применение АВР на стороне 0,4 кВ обосновано необходимостью обеспечения критерия надежности электроснабжения потребителей N-1 в нормальной и ремонтной схемах.

Вывод в ремонт одного силового трансформатора на ПС требует замыкания секционных выключателей 20 кВ на ПС. В этом случае электроснабжение потребителей будет обеспечиваться от одного источника питания, что для потребителей мегаполиса может являться недостаточно надежным. При этом отключение двух трансформаторов на ПС приводит к прекращению электроснабжения потребителей. Это является основным недостатком данной схемы.

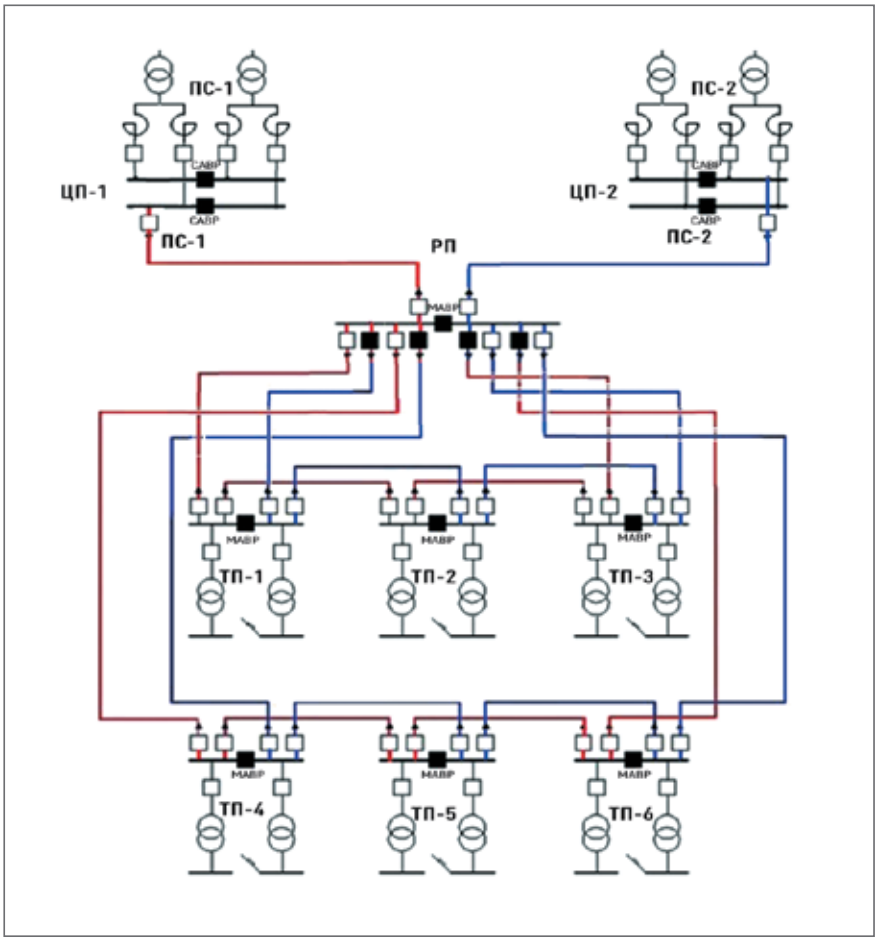
На рисунке 4 приведена схема электроснабжения от двух питающих ПС (ЦП) (радиальная конфигурация). В данной схеме в целях исключения шунтирующих связей по электрической сети 20 кВ между ПС в магистрали подключения ТП должны быть предусмотрены разрывы. Для обеспечения разрывов допускается одностороннее отключение кабельной линии. В данной схеме аварийное отключение участка сети 20 кВ приводит к срабатыванию АВР на стороне 20 кВ в ТП с переводом электроснабжения на оставшийся в работе источник питания с другой стороны (при отключении участка распределительной сети 20 кВ) или в РП (при отключении участка магистральной сети 20 кВ от ПС до РП), так как в данной схеме применение дифференциальных защит КЛ не предусматривается.

Аварийное отключение силового трансформатора на ПС, аварийное отключение питающей линии в РП или ТП приводит к срабатыванию АВР на стороне 20 кВ ПС или в РП, ТП соответственно.

Аварийное отключение силового трансформатора в ТП приводит

СХЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОТ ДВУХ ПИТАЮЩИХ ПОДСТАНЦИЙ И ОДНОГО РП (РАДИАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ)

Рис. 5



к отключению выключателя в цепи питания трансформатора и переводу нагрузки по стороне 0,4 кВ на оставшийся в работе трансформатор вручную. АВР по стороне 0,4 кВ не предусматривается в связи с тем, что АВР на стороне 20 кВ устанавливается в обязательном порядке и питание ТП осуществляется от двух питающих подстанций. В данном случае критерий надежности электроснабжения потребителей N-1 в ремонтной схеме не обеспечивается в полной мере.

Вывод в ремонт участка КЛ 20 кВ обеспечивается с помощью дополнительных оперативных переключений.

Вывод в ремонт силового трансформатора на ПС не ухудшает надежность электроснабжения по сети 20 кВ.

Основными недостатками данной схемы являются:

- перерыв электроснабжения на время действия АВР при отказе одного из элементов сети 20 кВ;
- снижение эффективности использования КЛ из-за нахождения части КЛ в ненагруженном состоянии под рабочим напряжением;
- перевод нагрузки по стороне 0,4 кВ вручную.

На рисунке 5 представлена схема электроснабжения от двух питающих подстанций и одного РП (радиальная схема).

Схема обладает большей надежностью, по сравнению со схемой на рисунках 2 и 3, за счет резервирования аварийного отключения питающей подстанции и двухстороннего подключения магистральных линий. В целях исключения шунтирующих связей по электрической сети 20 кВ в магистрали подключения ТП должны быть предусмотрены разрывы. Для обеспечения разрывов допускается одностороннее отключение кабельной линии. При этом отличительной особенностью данной схемы, по сравнению со схемой на рисунке 3, является применение одного РП.

На рисунке 6 приведена схема электроснабжения от двух питающих подстанций (кольцевая конфигурация).

В данной схеме каждый РП связан с ЦП разных ПС, однако схема организована так, что электроснабжение одной цепочки магистрали 20 кВ ЦП–РП–ТП–РП–ЦП осуществляется по петлевой схеме от одного силового трансформатора ПС.

Эта схема позволяет исключить перерыв электроснабжения на время действия АВР, поскольку в случае отказа элемента электрической сети 20 кВ отключение участка сети осуществляется действием дифференциальной защиты КЛ с выделением аварийного участка и сохранением питания шин ТП от оставшейся в работе КЛ. Также схема позволяет обеспечить вывод в ремонт элемента электрической сети 20 кВ без ограничения электроснабжения потребителей, при этом выводе схема частично преобразуется в радиальную.

Вывод в ремонт силового трансформатора на ПС не ухудшает надежность электроснабжения по сети 20 кВ. Аварийное отключение сило-

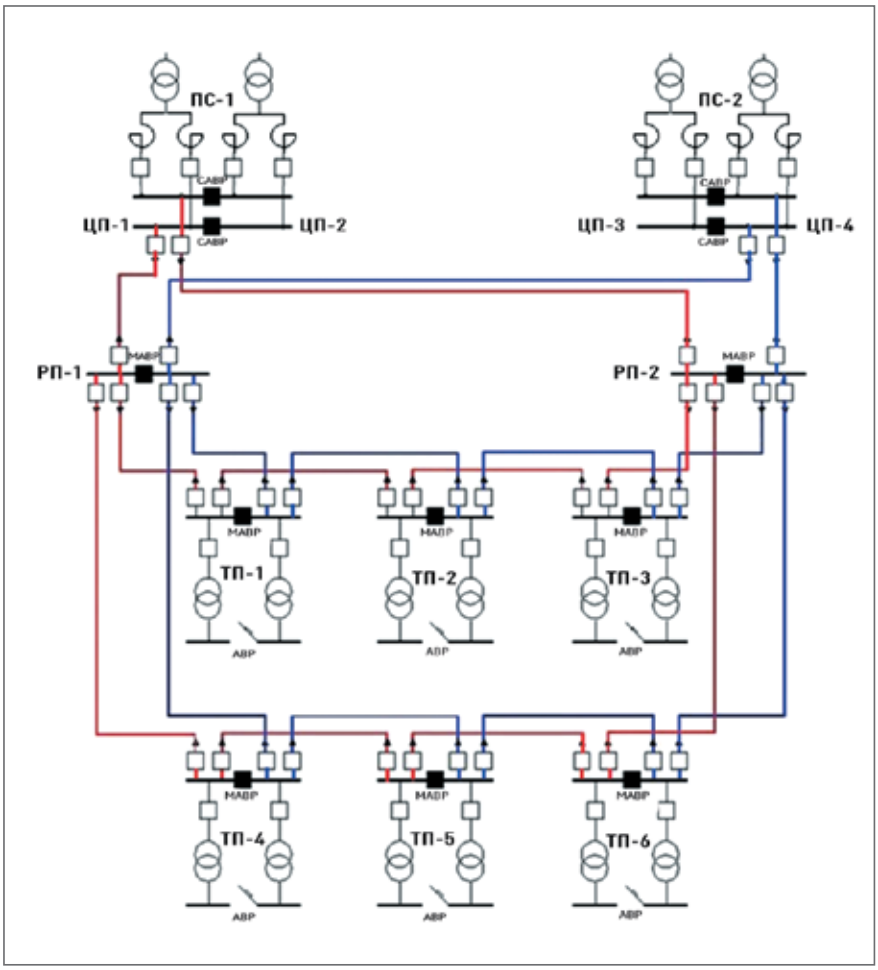
вого трансформатора на ПС приводит к срабатыванию АВР на стороне 20 кВ ПС с переводом электроснабжения на оставшийся в работе трансформатор, что является единственным недостатком данной схемы, который заключается в возникновении бестоковой паузы на время действия защит и срабатывания АВР.

Аварийное отключение силового трансформатора в ТП приводит к срабатыванию АВР на стороне 0,4 кВ ТП с переводом электроснабжения на оставшийся в работе трансформатор. Установка АВР на стороне 20 кВ в ТП не требуется в случае применения в данной схеме дифференциальной защиты КЛ с выделением аварийного участка и сохранением питания шин ТП. Применение АВР на стороне 0,4 кВ обосновано необходимостью обеспечения критерия надежности электроснабжения потребителей N-1 в нормальной и ремонтной схемах.

Количество и номинальная мощность силовых трансформаторов ТП, РТП должны приниматься исходя из 100 % резервирования номинальной мощности и возможной 30 % перегрузки от номинальной мощности на время работы автоматического ввода резерва 20 кВ или 0,4 кВ, а также перевода нагрузки вручную на один трансформатор (в случае неисправности АВР) в течение двух часов для масляных трансформаторов — с коэффициентом аварийной загрузки 1,3, для сухих трансформаторов с литой изоляцией — с коэффициентом аварийной загрузки 1.

СХЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОТ ДВУХ ПИТАЮЩИХ ПОДСТАНЦИЙ (КОЛЬЦЕВАЯ КОНФИГУРАЦИЯ)

Рис. 6



Методологические аспекты технологического проектирования электрических сетей напряжением 20 кВ мегаполиса

Согласно п. 1.2.16 ПУЭ (7-е издание) [9], работа электрических сетей напряжением 2–35 кВ может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор. Вместе с тем в ПУЭ отсутствуют разделы, учитывающие особенности построения электрической сети с резистивно-заземленной нейтралью. Анализ существующей в России нормативно-технической документации в части электрической сети 20 кВ показывает, что:

- требования действующих нормативно-технических документов в основном распространяются и применимы для электрической сети 20 кВ с изолированной нейтралью;
- для электрической сети 20 кВ с резистивным заземлением нейтрали требования в действующих нормативно-технических документах в ряде случаев отсутствуют либо недостаточны;
- отсутствуют нормы технологического проектирования городских электрических сетей напряжением 20 кВ с резистивным заземлением нейтрали.

Подключение резистора сопротивлением 12 Ом в нейтраль сети 20 кВ приводит к протеканию активного тока ОЗЗ, достигающего 1000 А.

При начальном развитии сети 20 кВ с резистивным заземлением нейтрали не применялись специальные меры по уменьшению емкостных токов, поскольку величина емкостных токов, по сравнению с активным током резистора, была незначительна и влияние их на суммарный ток ОЗЗ оценивалось достаточно минимально, а длительность воздействия была ограничена из-за автоматического отключения при возникновении ОЗЗ. При этом в действующих нормативных документах не рассмотрен вопрос необходимости и отсутствуют требования по компенсации емкостных токов для электрической сети с резистивным заземлением нейтрали.

Подключение большого числа присоединений к одной секции шин, характерное для развитой городской кабельной сети, приводит к значительному увеличению суммарного емкостного тока ОЗЗ секции шин, который становится сопоставим с током резистора. В этих условиях необходимо учитывать влияние емкостных токов при организации релейной защиты.

Для схемы мощной подстанции, скомпонованной из нескольких секций шин и имеющей большое количество присоединений, необходимо учитывать возможность протекания больших емкостных токов подпитки при возникновении ОЗЗ. Увеличение емкостного тока ОЗЗ, достигающего при развитой сети 20 кВ значений 600–800 А, приводит к повышению суммарного тока ОЗЗ до величин более 1000 А. Основная проблема влияния емкостных токов на работу релейной защиты связана с возникновением неселективной работы защит выключателей ввода и логической защиты шин (ЛЗШ).

Кабельные сети 20 кВ выполняются кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена. Выбор сечения жил и экранов этих кабелей осуществляется по условию термической стойкости изоляции при протекании токов нормального и аварийного режимов, которая нормируется значением тока термической стойкости и временем. Резистивное заземление нейтрали сетей 20 кВ с током резистора 1000 А позволяет осуществить селективное отключение ОЗЗ, что ограничивает время протекания тока ОЗЗ по экранам кабелей. При этом время действия резервных защит, как правило, меньше времени термической стойкости.

Увеличение аварийного тока экрана в режиме ОЗЗ за счет добавления к току резистора емкостного тока подходящих кабелей приводит к снижению допустимой длительности протекания тока. При достижении емкостным током ОЗЗ величины 900 А суммарный ток ОЗЗ возрастает до уровня 1350 А. Для этого тока допустимое время протекания тока по экрану кабеля уменьшается и может оказаться меньше времени действия резервных защит. При суммарной длине КЛ, подходящих к одной секции шин, свыше 300 км емкостной ток становится соизмерим с током резистора 1000 А, при этом ток в аварийном присоединении может достигать значений 1300–1400 А. При объединении более чем двух секций шин в режиме переключений или выводе в ремонт трансформатора могут наблюдаться еще большие значения емкостных токов.

Возрастание уровней емкостных токов присоединений при развитии сети 20 кВ и отсутствие их компенсации приводит к повышенным значениям суммарного тока ОЗЗ и связанным с этим проблемам обеспечения селективности работы релейной защиты и термической стойкости кабельных линий.

Увеличение длин КЛ 20 кВ, коммутируемых вакуумными выключателями, приводит к возможности возникновения явления эскалации перенапряжений при отключении повышенных емкостных токов. Значения перенапряжений могут достигать значений, опасных для изоляции установленного оборудования. Отключение односторонне включенной КЛ вакуумным выключателем может сопровождаться повторными пробоями межконтактного промежутка выключателя и связанным с этим повышением напряжения.

Таким образом, при развитии электрической сети с резистивным заземлением нейтрали необходимо рассматривать и учитывать проблему роста емкостных токов и их влияние на селективность работы релейной защиты, термическую стойкость кабелей и возможность возникновения перенапряжений при коммутациях вакуумными выключателями.

Следует также отметить влияние роста емкостных токов на обеспечение условий электробезопасности. В общем случае для обеспечения электробезопасности электроустановок нормативными документами устанавливаются параметры заземляющего устройства (ЗУ), к которым применяются требования к величинам сопротивления ЗУ ПУЭ п. 1.7.96 [9]. При этом установлены значения сопротивления заземляющих устройств для электроустановок с эффективно заземленной нейтралью и с изолированной нейтралью.

В вопросе нормирования сопротивления контура заземления подстанции сеть с низкоомным заземлением нейтрали занимает особое положение [10, 11]. С точки зрения величин токов, протекающих через ЗУ, эта сеть относится к сети с изолированной, точнее, неэффективно заземленной нейтралью. В то же время токи через ЗУ достаточно велики и достигают величин 1000 А и более. Значения сопротивления ЗУ для сетей с низкоомным заземлением нейтрали не нормируются требованиями

ПУЭ [9]. Нормирование условий электробезопасности по величинам напряжения прикосновения в соответствии с требованиями ГОСТ Р 12.1.038-2024 [12] является более универсальным условием, по сравнению с нормированием сопротивления ЗУ, и может применяться для сетей с резистивно-заземленной нейтралью. Основным затруднением прямого применения нормативных значений из ГОСТ Р 12.1.038-2024 является определение величин напряжений прикосновения.

Расчет значений напряжений прикосновения является многопараметрической задачей. При этом следует отметить, что в системе нормативно-технических документов, действующих в электроэнергетике, отсутствуют утвержденные методики, позволяющие проводить расчет значений напряжения прикосновения применительно к электрической сети с резистивным заземлением нейтрали.

Для электрической сети с низкоомным заземлением нейтрали обеспечение условий по электробезопасности должно проводиться на основе нормирования условий электробезопасности по допустимому напряжению повреждения [11, 12], нормируемому требованиями ГОСТ Р 50571.4.44-2019 [13].

Величины напряжения повреждения не должны превышать нормируемые значения для соответствующей продолжительности повреждения. Выполнение этого условия обусловливает выполнение требований по обеспечению электробезопасности. Достоинством ГОСТ Р 50571.4.44-2019 является представление методики расчета напряжения повреждения промышленной частоты, что позволяет с достаточной точностью определить его ожидаемые значения и сделать вывод о выполнении условий электробезопасности в соответствующих аварийных режимах.

Заключение

1. Внедрение и дальнейшее развитие электрических сетей 20 кВ в мегаполисах является технически и экономически оправданным и в ближайшей перспективе будет расширяться.

2. Технологическое проектирование электрических сетей напряжением 20 кВ мегаполиса должно учитывать современные требования к обеспечению надежности потребителей мегаполиса, особенности развития электрических сетей данного класса напряжения в условиях существующей инфраструктуры, значительные единичные мощности современных инженерных сооружений, присоединяемых к городским распределительным сетям, а также учитывать особенности режима заземления нейтрали с учетом накопленного опыта проектирования и эксплуатации.

3. Особенности электрических сетей 20 кВ с резистивным заземлением нейтрали обусловливают дополнительные требования при проведении технологического проектирования сети.

Рисунки к статье предоставлены авторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / под ред. С.С. Рокотяна, И.М. Шапиро. М.: Энергоатомиздат, 1985. 352 с.
2. Инструкция по проектированию городских электрических сетей: РД 34.20.185-94: утв. Минтопэнерго России, РАО «ЕЭС России» 31.05.1994 с изм. от 29.06.1999.
3. Майоров А.В. Технико-экономические аспекты развития электрических сетей напряжением 20 кВ. Электроэнергия. Передача и распределение. 2015. № 4. С. 74–79.
4. Лабузова А.В., Жагров Ю.С. Развитие электрических сетей напряжением 20 кВ в городе Москве. Электрические станции. 2017. № 5. С. 14–18.
5. Львов М.Ю., Камнев Д.Ю. Применение класса напряжения 20 кВ в системах электроснабжения современных мегаполисов. Вестник МЭИ. 2020. № 5. С. 83–88.
6. Майоров А.В. Схемные решения заземления нейтрали сети 20 кВ мегаполиса. Электрические станции. 2019. № 3.
7. Майоров А.В., Львов М.Ю., Долгов А.С. Централизация систем защит и автоматики сети 20 кВ мегаполиса. Электрические станции. 2021. № 7. С. 15–19.
8. Майоров А.В., Львов М.Ю., Челазнов А.А. Анализ надежности схемных решений электрической сети 20 кВ. Электрические станции. 2022. № 8. С. 33–41.
9. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. СПб.: Издательство ДЕАН, 2009. 704 с.
10. Майоров А.В., Львов М.Ю., Челазнов А.А., Никитина С.Д. Обеспечение электробезопасности в электрических сетях 20 кВ с низкоомным заземлением нейтрали. Электрические станции. 2022. № 5. С. 20–26.
11. Майоров А.В., Львов М.Ю., Челазнов А.А., Никитина С.Д. Нормирование условий обеспечения электробезопасности в распределительных городских электрических сетях напряжением 10–20 кВ с низкоомным заземлением нейтрали. Энергия единой сети. 2023. № 2 (69). С. 14–23.
12. ГОСТ Р 12.1.038-2024 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжения прикосновения и токов. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
13. ГОСТ Р 50571.4.44-2019 (МЭК 60364-4-44:2007). Национальный стандарт Российской Федерации. Электроустановки низковольтные. Часть 4.44. Защита для обеспечения безопасности. Защита от резких отклонений напряжения и электромагнитных возмущений. М.: Стандартинформ, 2019.

Для цитирования: Львов М.Ю., Челазнов А.А., Долгов А.С., Зотов С.С. Технологическое проектирование электрических сетей напряжением 20 кВ мегаполиса // Энергия единой сети. 2024. № 3–4 (74). С. 18–29.