

О выборе тока однофазного замыкания на землю в сети с низкоомным резистивным заземлением нейтрали

МАЙОРОВ А.В., ОСИНЦЕВ К.А., ШУНТОВ А.В.

Рассмотрены вопросы обоснования и выбора необходимых значений тока однофазного замыкания на землю в кабельных и воздушных сетях 20 кВ с низкоомным резистивным заземлением нейтрали. Показано, что искомые значения токов могут быть определены на основе гармонизации противоречивых влияющих факторов: надежности работы устройств релейной защиты и автоматики, требуемых сопротивлений заземляющих устройств электроустановок, включая безопасность персонала. При этом основным влияющим фактором является структура и параметры электрической сети.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрические сети 20 кВ, структура, параметры, заземление нейтрали, релейная защита, автоматика, заземляющие устройства

В 60-х годах прошлого века на страницах журнала «Электричество» был опубликован цикл статей [1–4 и др.] о выборе оптимальных уровней напряжения в городских и сельских электрических сетях, где показана эффективность применения номинальной ступени напряжения 20 кВ взамен традиционной 10 (6) кВ. В СССР сравнительно развитые электрические сети 20 кВ имелись в Латвии [5]. Вернее, первые линии 20 кВ построили в начале 30-х годов прошлого столетия, т.е. до вхождения в состав СССР. Однако с 80-х годов основное внимание было уделено развитию сетей 10 кВ. Кроме того, в 70–80-х годах в Коми АССР введено в эксплуатацию ограниченное число электроустановок 20 кВ. Они не получили в последующем должного развития. Это можно отнести к историческим эпизодам, не связанным с внятной технической политикой формирования сети 20 кВ.

Первое по-настоящему массовое строительство электрических сетей 20 кВ в стране началось, примерно, пять лет назад в Москве. К настоящему времени введено в эксплуатацию более 1000 км кабельных линий (КЛ) соответствующего класса напряжения. Решения по строительству кабельных сетей 20 кВ интенсивно прорабатываются в С. Петербурге и Екатеринбурге.

Сооружение воздушных сетей 20 кВ ведется в Ханты-Мансийском автономном округе в условиях, когда требуется передавать сравнительно высокие для сетей среднего напряжения мощности на относительно большие расстояния. Подобный вопрос интенсивно прорабатывается и для условий Московской области.

На первых этапах принятия решений во внимание принимался опыт западноевропейских стран (в

первую очередь – Франции, где сети 20 кВ представлены широко со второй половины прошлого века [6]). При их формировании во внимание принималась также богатая отечественная практика построения сетей 6–10 кВ. Однако электрическая сеть 20 кВ имеет свои особенности, в частности, низкоомное резистивное заземление нейтрали. Это влияет на выбор номинальных параметров проводников, параметров срабатывания устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), а также сопротивлений заземляющих устройств, включая безопасность персонала.

Кроме того, принципы построения структуры сетей 20 кВ в России и западноевропейских странах различаются. Так, за рубежом в сетях среднего напряжения нет уровня питающей сети (только распределительные сети), а электрическая сеть низшего напряжения 0,4 кВ замкнута [6, 7].

В результате такого подхода был упущен ряд важных причинно-следственных связей в структуре и параметрах сети сравнительно новой для нас ступени напряжения. При этом в полной мере не были учтены вопросы надежности и безопасности электроустановок.

Выбор тока однофазного замыкания на землю в городских кабельных сетях 20 кВ. Сеть 20 кВ формировалась с низкоомным резистивным заземлением нейтрали. Общемировая практика режимов заземления нейтрали в сетях среднего напряжения анализировалась в большом числе публикаций, например [8–10 и др.], поэтому описание преимуществ такого режима не приводится.

В настоящее время в Москве введено в эксплуатацию более 20 подстанций 110–220/20 кВ. Они являются центрами питания (ЦП) сети рассматривае-

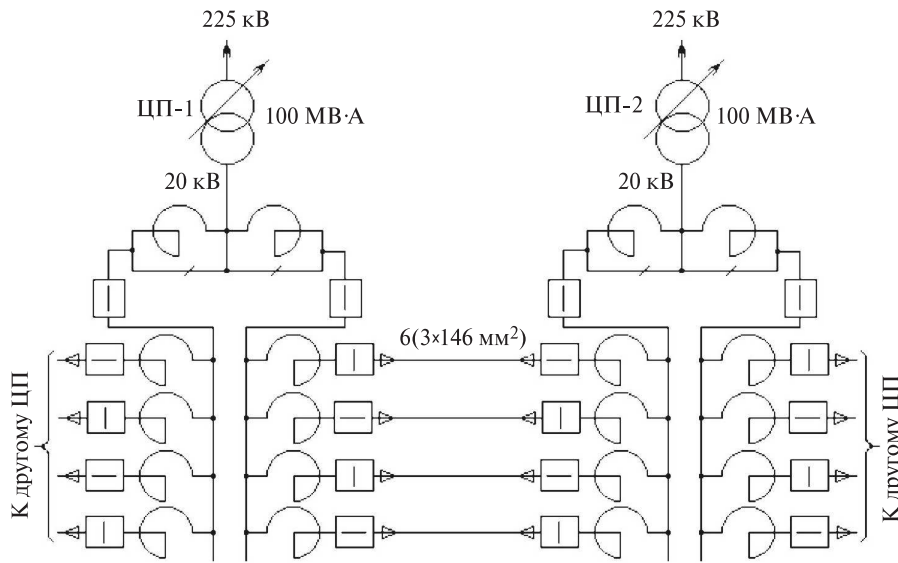


Рис. 1. Схема электрических сетей 20 кВ Парижа

мого класса напряжения. Копируя схему построения сетей 20 кВ Парижа, на всех ЦП в нейтралях 20 кВ силовых трансформаторов 110–220/20 кВ были установлены резисторы сопротивлением $R_p = 12$ Ом. При этом ток однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) (по сути – ток, протекающий через резистор) $I_p \approx U_{ном}/(\sqrt{3}R_p) = 0,96$ кА, где $U_{ном}$ – номинальное напряжение сети.

При этом никто не обратил внимания на зарубежную структуру сети 20 кВ (рис. 1) [6, 7]. Трансформаторные подстанции (ТП) 20/0,4 коммутируются к магистралям 20 кВ преимущественно на ответвлениях (наглухо) или выключателями нагрузки. Выключатели устанавливаются лишь на присоединениях собственно трансформаторов 20/0,4 кВ. При подобной архитектуре вся электрическая сеть считается распределительной.

На протяжении десятилетий системы электроснабжения городов в нашей стране формируются по так называемой двухзвенной архитектуре (рис. 2). Первое звено – это питающие сети, т.е. КЛ от ЦП до распределительных пунктов (РП), а второе – распределительные сети, т.е. КЛ от РП до ТП. От них на напряжении 0,4 кВ питаются конечные потребители. Число отходящих от ЦП и РП линий на рис. 2 показано условно.

При двухзвенной архитектуре появляется дополнительно три ступени селективности Δt устройств РЗА (рис. 2): на вводном и секционном выключателях РП, а также на выключателях, отходящих к ТП линий. В результате за рубежом для токовых защит отходящих от ЦП кабелей (схема рис. 1) достаточна выдержка времени 0,3–0,4 с, а для двухзвенной архитектуры – не менее 1,0 с. Последнее чрезвычайно ужесточает расчетные усло-

вия обоснования и выбора проводников, аппаратов и заземляющих устройств электроустановок.

В России нет нормативной базы по формированию электрической сети 20 кВ. Согласно [11] работа сетей до 35 кВ может предусматриваться с различным режимом заземления нейтралей, в том числе через резистор. При этом требования к заземляющим устройствам электроустановок выше 1 кВ, являющихся одним из основных критериев электробезопасности, нормируются лишь для сетей с эффективно заземленной и изолированной нейтралью. Поэтому при решении вопросов электробезопасности в сети 20 кВ с низкоомным резистивным заземлением нейтрали необходимо принимать во внимание обеспечение норм по напряжению прикосновения и шаговому напряжению [12, 13].

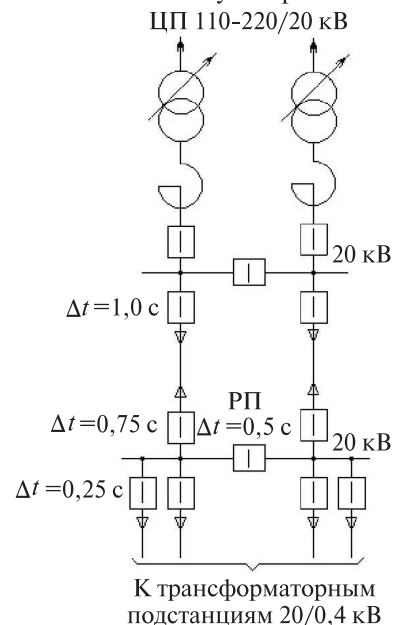


Рис. 2. Двухзвенная схема электрической сети 20 кВ

Так, по приведенной в [13] известной кривой допустимого напряжения повреждения (при прикосновении) от времени повреждения (отключения) t нетрудно оценить требуемое сопротивление заземляющего устройства $R_3(t) = Uf(t)/I_p$ в зависимости от тока ОЗЗ, создаваемого резистором (табл. 1).

Из табл. 1 следует, что при принятом на всех ЦП $I_p \approx 1$ кА, двухзвенной архитектуре сети и выдержках времени отключения ОЗЗ 0,75 с сопротивление заземляющих устройств для РП 20 кВ (рис. 2) должно быть чуть более 0,1 Ом, что недостижимо. При отсутствии в стране нормативных требований к заземляющим устройствам электроустановок 20 кВ проектные организации пошли по пути наименьшего сопротивления, взяв в качестве искомого значения минимально возможные 0,5 Ом для электроустановок с эффективно-заземленной нейтралью из [11]. При этом в городских условиях добиться даже таких сопротивлений у широко применяемых малогабаритных РП и ТП крайне сложно, причем даже используя весьма дорогостоящие специальные глубинные электроды.

Таблица 1

Время отключения ОЗЗ, с	Напряжение повреждения, В	Допустимое сопротивление заземляющего устройства (Ом) при разных значениях I_p (А)			
		1000	800	600	400
до 0,1	500	0,49	0,60	0,80	1,12
0,2	400	0,39	0,49	0,63	0,89
0,5	200	0,20	0,24	0,32	0,45
0,7	130	0,13	0,16	0,21	0,29
1,0	100	0,10	0,12	0,16	0,22
1,0–5,0	70	0,07	0,09	0,11	0,16

Примечание: Оценка сопротивлений заземляющих устройств проведена при условии наложения на ток резистора емкостного тока значением до 200 А.

Из табл. 1 также следует, что требования к сопротивлению заземляющих устройств смягчаются по мере снижения тока ОЗЗ. Последнее ограничи-

вается надежной работой устройств РЗА, а именно минимально допустимым коэффициентом чувствительности, который для кабельных сетей принимается $K_q > 1,25$, а для воздушных — $K_q > 1,5$ [11].

Защита от токов ОЗЗ в кабельных сетях указанного ранее региона выполнена ненаправленными токовыми защитами нулевой последовательности (ТЗНП). Методика выбора параметров их срабатывания известна (например, [14]) и поэтому подробно не рассматривается.

В ячейках комплектных распределительных устройств устанавливаются однофазные трансформаторы тока. На их базе конфигурируют фильтры тока нулевой последовательности (ФТНП). При этом ток срабатывания устройств РЗА $I_{ср}$ отстраивается от тока небаланса трансформаторов тока при КЗ $I_{нб}$ (токи КЗ, как правило, ограничены 12 кА). Из табл. 2 видно, что обеспечить требуемую чувствительность ТЗНП не представляется возможным.

Для обеспечения требуемой чувствительности защиты от ОЗЗ с токами $I_p = 400 \div 1000$ А может быть введена дополнительная выдержка времени, превышающая таковую для защит от междуфазных КЗ на ступень селективности (0,2–0,3 с). В этом случае проводится отстройка ТЗНП от токов нагрузки $I_{нагр}$. При $I_p = 400 \div 1000$ А и теоретически возможном значении $I_{нагр} = 1000$ А расчетный коэффициент чувствительности защит $K_q = 6,7 \div 16,7$ (табл. 2), что значительно превышает требуемое значение. Следовательно, для обеспечения нормируемого для кабельных сетей $K_q \geq 1,25$ достаточно принять минимальный ток резистора $I_{pmin} = 90$ А (130 Ом). При этом токе чувствительность ТЗНП обеспечивается с запасом. Однако введение дополнительной выдержки времени нежелательно вследствие ужесточения требований к сопротивлению заземляющих устройств.

Для обеспечения чувствительности ненаправленной ТЗНП, реагирующей на основную гармонику тока $3I_0$ с выделенным кабельным трансформатором тока нулевой последовательности

Таблица 2

Тип защиты от ОЗЗ	Ток срабатывания	Коэффициент чувствительности $K_q = I_{ОЗЗ}/I_{ср} \geq 1,25$	Ток/сопротивление резистора, А/Ом
Ненаправленная токовая защита нулевой последовательности с ФТНП	$I_{ср} = k_n I_{нб}$; $I_{нб} = k_{одн} \varepsilon I_{КЗ}$	0,29–0,73; $I_{КЗ} = 12$ кА	1000/12
То же, но с отстройкой по времени от междуфазных КЗ	$I_{ср} = k_n I_{нб}$; $I_{нб} = k_{одн} \varepsilon I_{нагр}$	6,7–16,7; $I_p = 400–1000$ А	90/130
Ненаправленная токовая защита нулевой последовательности с ТТНП	$I_{ср} = k_n k_{бр} I_C$	1,25–1,50; $I_C = 68–85$ А	230/50

Примечание: $k_{одн}$ — коэффициент однотипности трансформаторов тока; ε — погрешность обмотки трансформатора тока; k_n — коэффициент надежности; $k_{бр}$ — коэффициент броска емкостного тока; $I_{КЗ}$ — ток КЗ.

(ТТНП), в качестве условия выбора тока резистора принимается отстройка от наибольшего емкостного тока присоединения I_C . Для кабеля с сечением жилы 500–630 мм², емкостью $C_{\Phi} = 0,42 \div 0,46$ мкФ/км и предельно возможной в условиях мегаполиса длине КЛ 15÷17 км $I_C = 68 \div 85$ А. Откуда требуемое значение $I_{pmin} = 230$ А, которое обеспечивается сопротивлением резистора всего лишь 50 Ом (табл. 2). Таким образом, для реальной схемы электрической сети 20 кВ значение тока резистора может быть в 4 раза меньше принятого в настоящее время (около 1 кА). Последнее принципиально важно с позиций приемлемых сопротивлений заземляющих устройств и обеспечения безопасности персонала.

В сетях среднего напряжения России широко распространены РП, а в западноевропейских странах — так называемые «соединительные пункты» (СП). Они отличаются от РП тем, что в них устанавливаются не выключатели, а выключатели нагрузки. В последнем случае любые КЗ в сети отключаются выключателями ЦП. Для быстрого восстановления схемы электрическая сеть должна иметь современные средства телемеханики и каналы связи для ее дистанционной реконфигурации после аварий. На практике это не всегда достигается синхронно во времени. Поэтому технология СП не получила у нас широкого применения. Тем не менее, заслуживает внимания предложение по изменению подходов к формированию сети 20 кВ [15] — использование главных СП. Это нечто среднее между РП и СП, когда выключатели устанавливаются только на вводах, а на отходящих линиях и секционной перемычке — выключатели нагрузки. Автоматический ввод резерва (АВР) отсутствует, тем более, что он обычно есть на стороне 0,4 кВ ТП. При этом выдержки времени защит от ОЗЗ снижаются на две ступени селективности (суммарно около 0,5 с).

Таким образом, лишь за счет схемных решений и выбора необходимого минимального тока ОЗЗ можно добиться приемлемых сопротивлений заземляющих устройств и требуемой электробезопасности в кабельных сетях 20 кВ с низкоомным резистивным заземлением нейтрали.

Выбор тока однофазного замыкания на землю в воздушных сетях 20 кВ. Последние годы строительство воздушных сетей 20 кВ велось в Ханты-Мансийском автономном округе. Причем за основу был взят финский опыт, где сети рассматриваемого класса напряжения имеют изолированную нейтраль [16]. Причина в том, что в этой стране значения удельного сопротивления грунтов более чем на порядок выше среднеевропейских. В нашем случае интерес представляет режим низкоомного рези-

стивного заземления нейтрали, позволяющего селективно отключать поврежденное присоединение при ОЗЗ.

Методика выбора параметров срабатывания защит от ОЗЗ в воздушных и кабельных сетях имеет лишь некоторые отличия. В частности, для воздушных сетей:

$K_{\Phi} \geq 1,5$, а не 1,25 как для кабельных;
более низкие значения емкостных токов;

для защиты силовых трансформаторов 20/0,4 кВ используются преимущественно плавкие предохранители, а не выключатели;

широко задействовано автоматическое повторное включение (АПВ) линий и др.

При выборе тока ОЗЗ в воздушных сетях необходимо принять во внимание их характерную предпочтительную конфигурацию (рис. 3) [17]. Она представляет собой известную петлевую схему с подключением от двух географически разнесенных ЦП 110/20 кВ, секционированную реклоузерами — автоматическими пунктами секционирования воздушной линии (ВЛ). Трансформаторные подстанции 20/0,4 подключаются к основной магистрали на ответвлениях с установкой разъединителя или реклоузера (на ответвлении длиной более 2 км). Защита трансформаторов 20/0,4 осуществляется предохранителями на стороне 20 кВ. В нормальном режиме схема сети разомкнута на одном из реклоузеров с использованием АВР. Число ответвлений к ТП между коммутационными устройствами основной магистрали на рис. 3 показано условно (обычно 5–7). Устанавливаются преимущественно однострановые комплектные ТП (КТП) столбового типа (номинальная мощность трансформатора $S_{ном} = 16 \div 100$ кВА), мачтового — ($S_{ном} = 160 \div 250$ кВА) и киоскового — ($S_{ном} = 400 \div 1000$ кВА).

Схема, приведенная на рис. 3, в реальных условиях бывает еще более громоздкой и имеет большее число пунктов секционирования. У терминалов РЗА современных реклоузеров минимальная ступень селективности по времени, гарантированная заводом-изготовителем, составляет всего 0,1 с. Последнее меньше, чем у устройств РЗА, устанавливаемых в ячейках комплектных распределительных устройств (КРУ) ЦП и РП (0,2÷0,3 с). Однако даже в простейшей схеме на рис. 3 в ремонтном режиме при отключении, допустим, выключателя Q5 (при этом должны быть включены Q1–Q4), выдержки времени защит от ОЗЗ на головных участках превысят 0,5 с с учетом времени перегорания предохранителей (плавких вставок). При этом стоимость заземляющего устройства может превысить (и заметно) затраты на саму КТП, что нера-

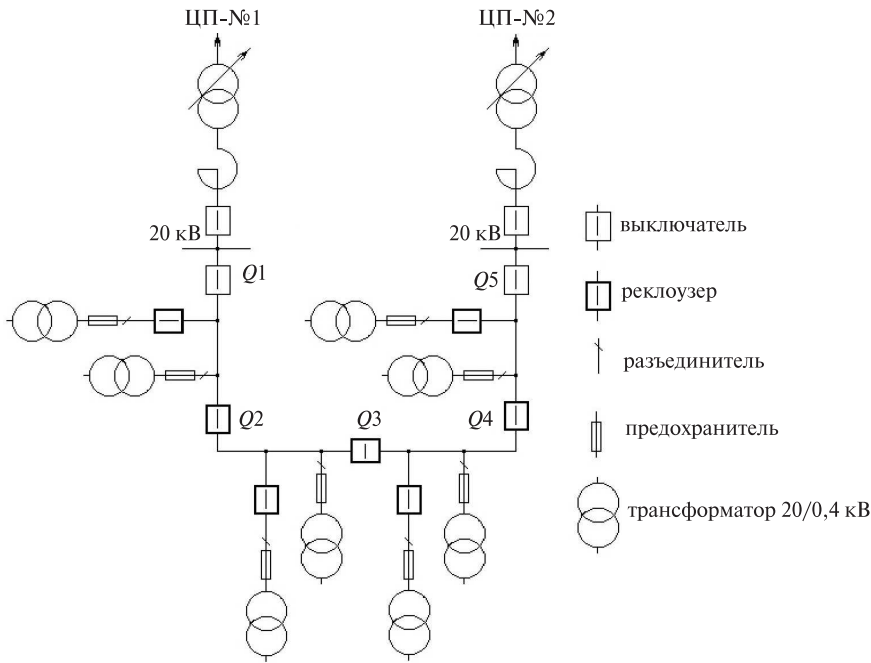


Рис. 3. Типовая схема воздушной сети

ционально. Поэтому ступенчатая отстройка по времени устройств РЗА (как это принято для кабельных сетей) в воздушных сетях не применима.

При ОЗЗ работа РЗА должна работать с минимально возможным временем Δt неселективного отключения всех коммутационных устройств и далее — с их последовательным однократным АПВ с ускорением защит, начиная с выключателя ЦП. Время ускорения защит t_y в воздушных сетях обычно не менее 0,1 с. Минимально возможное время отстройки защит $t_{отс}$ ЦП и «нижестоящего» реклоузера — это 0,2 с, т.е. ступень селективности, га-

рантированная заводом-изготовителем устройств РЗА, поэтому $\Delta t = t_y + t_{отс} = 0,1 + 0,2 = 0,3$ с. (рис. 4).

На рис. 4,а приведен исходный фрагмент схемы на рис. 3. Однофазное замыкание на землю происходит, допустим, на участке между реклоузерами Q2 и Q3. На рис. 4,б приведена схема после неселективного отключения ОЗЗ аппаратами Q1 и Q2 с выдержкой времени $\Delta t = 0,3$ с. Восстановление схемы идет от ЦП в цикле однократного АПВ с ускорением защит ($t_y = 0,1$ с) выключателем Q1 после бестоковой паузы — рис. 4,в. Далее от АПВ включается реклоузер Q2 (рис. 4,г) на ОЗЗ с последующим отключением от защит с ускорением (рис. 4,д). Наконец, от АВР включается реклоузер Q3 (рис. 4,е)

с последующим его отключением от защит с ускорением и локализацией замыкания на землю (на рис. 4 данный фрагмент не показан).

Времени $\Delta t = 0,3$ с должно быть достаточно, чтобы в первую очередь перегорел предохранитель защищаемого присоединения (при повреждении последнего). Поэтому токи срабатывания устройств РЗА в схеме на рис. 3 следует отстроить от время-токовых характеристик плавления плавких вставок предохранителей: $I_{ср} = (1 + \varepsilon) I_{пр}(t)$, где $\varepsilon = 0,15$ — коэффициент, учитывающий погрешности терминалов РЗА и трансформаторов тока (для реклоузеров достаточно 0,05); $I_{пр}(t)$ — ток плавления плавкой вставки предохранителя, зависящий от времени t , с учетом стандартного 20%-го разброса их время-токовых характеристик.

При выборе сопротивлений заземляющих устройств КТП 10(6) кВ, т.е. в сетях с изолированной нейтралью, более жесткие требования к их значениям предъявляет не сторона 10(6) кВ электроустановки (где $R_3 \leq 250/I_{ОЗЗ}$, но не более 10 Ом [11]), а сторона 0,4 кВ, где $R_3 = 4$ Ом. Выполнение такого заземляющего устройства не обременительно как с финансовой, так и материальной стороны. Было бы желательно, чтобы и для электрической сети 20 кВ сохранился порядок этих значений (например, не 4, а хотя бы 2 Ом). Как уже отмечалось $R_3 = 0,5$ Ом не приемлемо, так как затраты на него могут превысить таковые

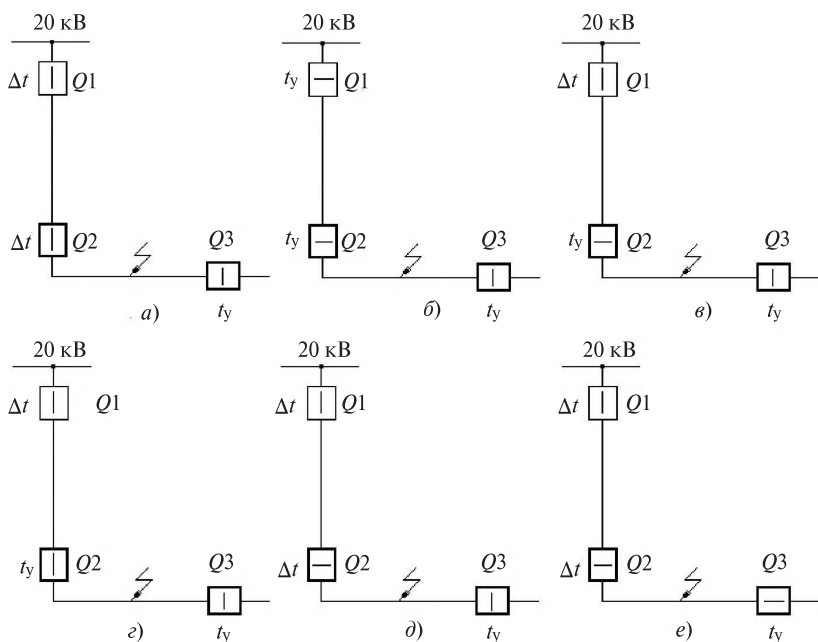


Рис. 4. Принцип локализации ОЗЗ в воздушных сетях 20 кВ

Таблица 3

Номинальная мощность трансформатора, кВА	Ток плавления плавкой вставки предохранителя, А	Коэффициент чувствительности РЗА*, отн. ед.			
		при токе однофазного замыкания на землю, А			
		100	200	300	400
		при сопротивлении заземляющего устройства, Ом			
		4,25	2,13	1,42	1,06
До 160	41	2,1	4,3	6,4	8,5
250	81	1,1	2,2	3,2	4,2
400	92	1,0	1,9	2,8	3,8
630	113	0,8	1,5	2,3	3,1
1000	164	0,5	1,1	1,6	2,1

* Без учета допустимой аварийной перегрузки трансформаторов и возможного снижения на 10–20% тока ОЗЗ на протяженной магистрали

на отдельно взятую КТП, т.е. электроустановку массового применения, которая должна быть максимально экономичной.

В табл. 3 приведены данные, полученные при изменении тока ОЗЗ и неселективном его отключении при $\Delta t = 0,3$ с.

Из анализа данных табл. 3 для воздушных сетей 20 кВ с низкоомным резистивным заземлением нейтрали следуют важные выводы. Во-первых, при сохранении сопротивлений заземляющих устройств электроустановок на уровне 4 Ом (как это принято для ТП 10(6)/0,4 кВ) мощность трансформатора 20/0,4 кВ должна быть ограничена 160 кВА при минимально возможном токе ОЗЗ, равном 100 А по критерию надежной работы устройств РЗА ($K_q \geq 1,5$). Во-вторых, при снижении указанных сопротивлений до 2 Ом мощность трансформатора ограничена 630 кВА при токе ОЗЗ 200 А. Наконец, при использовании трансформаторов до 1000 кВА требуется сооружать контуры заземления сопротивлением около 1,4 Ом при токе ОЗЗ 300 А.

Практика построения воздушных сельских (пригородных) электрических сетей среднего напряжения в промышленно развитых странах, как известно, демонстрирует тенденцию к снижению мощности подстанций для разукрупнения и упрощения сети 0,4 кВ, максимально приближая их к потребителю. В частности, во Франции мощность типовой ТП 20/0,4 кВ – 50 кВА. Можно отметить, что подобные тенденции стали принимать во внимание и отечественные ведущие сетевые организации.

В итоге, по мнению авторов, на данном временном промежутке наиболее компромиссным для отечественных воздушных электрических сетей 20 кВ с низкоомным резистивным заземлением нейтрали является ток однофазного замыкания на землю на уровне 200 А.

Выводы. 1. При выборе режима нейтрали электрической сети 20 кВ (т.е. выборе сопротивления резистора заземления нейтрали или тока однофазного замыкания на землю) требуется гармонизация противоречивых влияющих факторов: надежности работы устройств РЗА, требуемых сопротивлений заземляющих устройств электроустановок, включая безопасность персонала. При этом основным влияющим фактором является структура и параметры электрической сети, а именно, ее конфигурация, схемы распределительных устройств электроустановок, параметры оборудования.

2. В России нет нормативной базы по формированию электрических сетей 20 кВ. Первые этапы их внедрения опирались на западноевропейскую практику. При этом во внимание не принималась специфика построения сетей среднего напряжения в нашей стране и за рубежом. В результате такого подхода был упущен ряд важных причинно-следственных связей в структуре и параметрах сетей, учитывающих вопросы надежности и безопасности электроустановок. В частности, принятый ток однофазного замыкания на землю в городских кабельных сетях на уровне 1 кА (как во Франции) является неоправданно завышенным с позиций обеспечения электробезопасности электроустановок.

3. Гармонизация основных влияющих факторов в кабельных сетях 20 кВ (с учетом необходимых ограничений по электробезопасности) не представляется возможной при сохранении исторически обусловленной двухзвенной архитектуры их построения. Необходим поиск приемлемых технических решений, позволяющих упрощать схему коммутации сети и сокращать количество ступеней селективности устройств РЗА. Положения документа [18] об использовании в схеме сети распределительных

пунктов лишь при наличии технико-экономических обоснований, так и не были реализованы.

4. Для воздушных электрических сетей 20 кВ с низкоомным резистивным заземлением нейтрали компромиссным значением тока однофазного замыкания на землю видится 200 А при следующих ограничениях: номинальная мощность трансформатора 20/0,4 кВ не более 630 кВА; сопротивление заземляющего устройства не менее 2 Ом. При сопротивлении заземления 4 Ом мощность трансформатора ограничена 160 кВА. Независимо от рассматриваемых значений отключение замыкания на землю осуществляется неселективным действием устройств РЗА в течение 0,3 с. Последующее восстановление схемы и локализация повреждения реализуются в цикле последовательного однократного АПВ с ускорением защит, начиная с выключателя центра питания сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Червоненкис Я.М., Фингер Л.М. Об оптимальной системе напряжений для городских и сельских электросетей. — Электричество, 1965, № 7, с. 11–15.
2. Бессмертный И.С. Применение напряжений 6–10–20 кВ в городских электрических сетях. — Электричество, 1965, № 7, с. 16–22.
3. Захарин А.Г., Канакин Н.С. О выборе напряжений сельских распределительных электрических сетей и применении напряжения 20 кВ. — Электричество, 1966, № 7, с. 6–10.
4. Коршунов А.П. Перспективная система напряжения для электроснабжения сельских районов. — Электричество, 1966, № 7, с. 10–12.
5. Могильницкий Н.А., Шулов Б.С. Применение напряжения 20 кВ в Латвийской ССР. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963, 168 с.
6. Пелисье Р. Энергетические системы. — М.: Высшая школа, 1982, 568 с.
7. Козлов В.А. Электроснабжение городов. — Л.: Энергоатомиздат, 1988, 264 с.
8. Титенков С.С., Пугачев А.А. Режимы заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю. — Энергоэксперт, 2010, № 2, с. 36–43.
9. Рыжкова Е.Н., Фомин М.А., Жармагамбетова М.С. О критериях выбора режима резистивного заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ. — Промышленная энергетика, 2013, № 11, с. 23–30.
10. Назарычев А., Титенков С., Пугачев А. Комплексные инновационные решения по заземлению нейтрали в сетях 6–35 кВ. — ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2016, № 3, с. 40–46.
11. Правила устройства электроустановок. — М.: КНОРУС, 2010, 488 с.
12. ГОСТ 12.1.038–82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. — М.: ИПК Изд.-во стандартов, 2001, 7 с.
13. ГОСТ Р 50571–4–44–2011 (МЭК 60364–4–44:2007). Электроустановки низковольтные. Ч. 4-44. Требования по обеспечению безопасности. Защита от отклонений напряжения и электромагнитных помех. — М.: Стандартинформ, 2012, 48 с.
14. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. — М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001, 104 с.
15. Миридонов А., Ермаков А. Перспективы развития сетей 20 кВ в ПАО «МОЭСК». — ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2016, № 3, с. 58–59.
16. Шамапов Д. Распределительные сети Финляндии. Особенности схемных решений. — Новости электротехники, 2005, № 6: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/36/03.php>
17. Вологин А. Концепция развития распределительной сети среднего напряжения в Московской области. — ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2016, № 4, с. 76–79.
18. Инструкция по проектированию городских и поселковых электрических сетей. — М.: Минэнерго СССР, 1984, 56 с.

[24.04.2017]

А в т о р ы: Майоров Андрей Владимирович окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Московского энергетического института (МЭИ — ныне Национальный исследовательский университет «МЭИ» — «НИУ «МЭИ») в 1994 г. Генеральный директор АО «Объединенная энергетическая компания».

Осинцев Кирилл Анатольевич окончил энергетический институт Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в 2013 г. Соискатель кафедры электроэнергетических систем «НИУ «МЭИ».

Шунтов Андрей Вячеславович окончил ЭЭФ МЭИ в 1982 г. В 2002 г. защитил докторскую диссертацию «Применение системного подхода к формированию схем выдачи мощности электростанций» в МЭИ. Заместитель заведующего кафедрой электроэнергетических систем «НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 9, pp. 34–41

DOI:10.24160/0013-5380-2017-9-34-41

About the Selection of a Single-Phase Short-Circuit Current on Earth in the Network With Low-Ohm Resistive Grounding of the Neutral

MAIOROV Andrei V. (*Public Company «United Energy Company», Moscow, Russia*) — *Director General*

OSINTSEV Kirill A. (*National Research University «Moscow Power Engineering Institute» — «NRU «MPEI» Moscow, Russia*) — *Competitor of a scientific degree*

SHUNTOV Andrei V. (*«NRU «MPEI», Moscow, Russia*) — *Deputy Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)*

The questions of justification and selection of the required single-phase short-circuit current values on earth values in cable and air networks of 20 kV with low-ohm resistive grounding of the neutral were

considered. It is shown that the sought-for values of the short-circuit current can be determined on the basis of harmonization of conflicting influencing factors: the reliability of the relay protection and automation devices, the required resistances of the grounding devices of electrical installations, including personnel safety. In this case, the main influencing factor is the structure and parameters of the electrical network.

Key words: electrical networks of 20 kV, structure parameters, grounding of neutral, relay protection, automation, grounding devices

REFERENCES

1. Chervonenkis Ya.M., Finger L.M. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1965, No. 7, pp. 11–15.
2. Bessmertnyi I.S. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1965, No. 7, pp. 16–22.
3. Zakharin A.G., Kanakin N.S. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1966, No. 7, pp. 6–10.
4. Kozshunov A.P. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1966, No. 7, pp. 10–12.
5. Moguil'nitskii N.A., Shulov B.S. *Primeneniye napryazheniya 20 rV v Latviiskoi SSR – in Russ. (Application of 20 rV voltage in the Latvian SSR)*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat, 1963, 168 p.
6. Pelis'ye P. *Energeticheskiye sistemy – in Russ. (Power Systems)*. Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1982, 568 p.
7. Kozlov V.A. *Elektrosnabzheniye gorodov (Electricity supply of cities)*. Leningrad, Energoatomizdat, 1988, 264 p.
8. Tetnikov S.S., Pugachev A.A. *Energoekspert – in Russ. (Energy expert)*, 2010, No. 2, pp. 36–43.
9. Ryzhkova Ye.N., Fomin M.A., Zharmagambetova M.S. *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial energy)*, 2013, No. 11, pp. 23–30.
10. Nazarychev A., Titenkov S., Pugachev A. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye – in Russ. (Electricity. Transmission and distribution)*, 2016, No. 3, pp. 40–46.
11. *Pravila ustroystva elektroustanovok (Rules for electrical devices)*. Moscow, Publ. KNORUS, 2010, 488 p.
12. **GOST 12.1.038–82. Sistema standartov bezopasnosti truda. Elektrobezopasnost'. Predel'no dopustimye znacheniya napryazhenii prikasnoveniya i tokov (Occupational safety standards system. Electrical safety. Maximum permissible contact and current voltages)**. Moscow, Publ. house of standards, 2007, 7 p.
13. **GOST R 50571-4-44–2011 (МЭК 60364-4-44:2007). Elektroustanovki nizkovol'tnye. Ch. 4-44. Trebovaniya po obespecheniyu bezopasnosti. Zashchita ot otklonenii napryazheniya i elektromagnitnykh pomekh (Electrical installations are low-voltage. Part 4-4. Security requirements. Protection against voltage deviations and electromagnetic interference)**. Moscow, Publ. «Standartinform», 2012, 48 p.
14. Shuin V.A., Gusenkov A.V. *Zashchity ot zamykanii na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV (Protection against earth faults in 6–10 kV electric networks)*. Moscow, NTF «Energoprogress», 2001, 104 p.
15. Miridonov A., Yermakov A. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye – in Russ. (Electricity. Transmission and distribution)*, 2016, No. 3, pp. 58–59.
16. Shamanov D. *Novosti elektrotehniki – in Russ. (News of power engineering)*, 2005, No. 6: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/36/03.php>
17. Vologin A. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye – in Russ. (Electricity. Transmission and distribution)*, 2016, No. 4, pp. 76–79.
18. *Instruktsiya po proektirovaniyu gorodskikh i poselkovukh elektricheskikh setei (The instruction on designing of city and settlement electric networks)*. Moscow, Minenergo, 1984, 56 p.

[24.04.2017]