

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

О критериях выбора режима резистивного заземления нейтрали в сетях 6 – 35 кВ

Рыжкова Е. Н., доктор техн. наук, Фомин М. А., инж.,
НИУ “МЭИ”, Москва

Жармагамбетова М. С., канд. техн. наук

Казахская академия транспорта и коммуникаций, Алма-Ата

Представлена общая методология выбора и применения резистивного заземления нейтрали в России без учета вида электрической сети (кабельная, воздушная), состава ее электроприемников (наличие, отсутствие высоковольтных двигателей), режима работы, конкретных особенностей технологии производства. Показано, что отечественными нормативными документами не определены области применения режима резистивного заземления нейтрали в сетях 6 – 35 кВ в той мере, как это сделано для режима компенсированной нейтрали. Обозначены границы токов замыкания на землю для высокоомного и низкоомного заземления в соответствии с общей отечественной идеологией построения электрических сетей выше 1 кВ. Приведены различные способы резистивного заземления нейтрали в сетях 6 – 35 кВ. Описан механизм возникновения перенапряжений при однофазном замыкании на землю в сети с резистивным заземлением нейтрали, указаны условия выбора резистора для их ограничения. Отмечены расхождения нормативных документов ГОСТ и ПУЭ в отношении мер электробезопасности сетей с малыми токами замыкания на землю, указаны критерии выбора резистора по обеспечению электробезопасности электроустановок. Проанализирован переходный процесс при однофазном замыкании на землю для различных значений активной составляющей тока. Изложены требования к выбору резистора для обеспечения чувствительности и селективности релейной защиты при однофазном замыкании на землю в электрических сетях. Обозначены проблемы высокоомного заземления нейтрали, из-за которых релейная защита может работать некорректно. Указаны целесообразные области применения высокоомного и низкоомного заземления нейтрали в зависимости от категории электроприемников по надежности электроснабжения.

Ключевые слова: резистивное заземление нейтрали, однофазное замыкание на землю, емкостный ток, электробезопасность, релейная защита.

В настоящее время в России Правилами устройства электроустановок 7-го издания [1] предусмотрена работа электрических сетей 6 – 35 кВ с тремя режимами нейтрали:

- изолированной (незаземленной);
- заземленной через дугогасящий реактор (компенсированная сеть);
- заземленной через резистор.

При выборе того или иного режима нейтрали, являющегося многокритериальной задачей, предполагается решение следующих вопросов:

- надежности электроснабжения электроприемников;
- предотвращения значительных повреждений электрооборудования при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ): из-за перена-

пряжений, перехода ОЗЗ в многофазные и двойные замыкания на землю, термического воздействия ОЗЗ на элементы электрической сети и др.;

- обеспечения безопасной эксплуатации электрической сети и присоединенных к ней электроприемников;

- организации эффективной защиты от ОЗЗ.

Режим заземления нейтрали через резистор используется в России ограниченно прежде всего из-за отсутствия отечественных нормативных документов, регламентирующих в полном объеме комплекс перечисленных выше вопросов применительно к резистивному заземлению нейтрали.

Рассмотрим более подробно основные критерии, касающиеся выбора и применения резистивного заземления нейтрали.

Типы резисторов и схемы их включения

Резистивное заземление может быть двух видов (высокоомное и низкоомное), различающихся значением разрешенного тока замыкания на землю. Хотя уровни тока замыкания на землю, которые определяли бы эти два вида, не стандартизованы, на практике они четко различаются. Так, в США для высокоомного резистора ток замыкания на землю I_3 ограничивается 10 А, а для низкоомного резистора находится в диапазоне 100 – 1000 А, причем значение 400 А является типичным [2]. Согласно нормам французской сетевой компании “Electricite de France” при высокоомном заземлении нейтрали суммарный ток в месте повреждения не превышает 10 А, а низкоомный резистор выбирается таким, чтобы ток однофазного замыкания в воздушных сетях не превышал 300 А (в кабельных — 1000 А). По бельгийским нормам ток однофазного замыкания в сети с низкоомным резистором лимитируется значением 500 А [3].

В России отсутствуют нормативные документы, определяющие значения токов замыкания на землю для таких сетей. **Несмотря на это, деление на высокоомное и низкоомное заземление нейтрали не должно противоречить общей отечественной идеологии построения электрических сетей выше 1 кВ, определяющей границы электроустановок с большими и малыми токами замыкания на землю, характерные для них требования электробезопасности, принципы построения релейной защиты и др.**

Рассмотрим данный вопрос подробнее. Согласно [4] сеть с изолированной нейтралью считается такая сеть, в которой ни одна из нейтралей генераторов и силовых трансформаторов не имеет соединения с землей, за исключением соединений через приборы измерения, защиты, сигнализации, дугогасящий реактор и другие аппараты с большим сопротивлением. Исходя из этого определения, сеть с высокоомным заземлением нейтрали (как и компенсированная сеть) является частным случаем сети с изолированной нейтралью. Следовательно, граничными токами замыкания на землю для нее должны быть токи, нормируемые в [1] для сети с изолированной нейтралью без компенсации, а именно:

- < 30 А при напряжении 3 – 6 кВ;
- < 20 А при напряжении 10 кВ;
- < 15 А при напряжении 15 – 20 кВ;
- < 10 А в сетях напряжением 3 – 20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи, и во всех сетях напряжением 35 кВ;
- < 5 А в схемах генераторного напряжения 6 – 20 кВ блоков “генератор — трансформатор”.

В данном диапазоне токов при ОЗЗ разрешается срабатывание релейной защиты (РЗ) на землю на сигнал (если это не противоречит условиям электробезопасности работы электроустановки), что характерно для высокоомного заземления нейтрали [1].

Низкоомное заземление нейтрали, для которого предусматривается при ОЗЗ действие РЗиА на отключение, может выполняться в сетях с любым емкостным током, при этом ток замыкания на землю не должен превышать 500 А (верхний предел токов для электроустановок выше 1 кВ с малыми токами замыкания на землю, к которым в России относятся все сети 6 – 35 кВ).

Ток замыкания на землю складывается из емкостного тока сети I_C и активного тока I_R , создаваемого резистором заземления нейтрали:

$$I_3 = \sqrt{I_C^2 + I_R^2}; \quad (1)$$

Указанные токи суммируются векторно и сдвинуты друг относительно друга на 90°.

Схемы включения резисторов в сеть могут отличаться в зависимости от наличия/отсутствия выведенной нейтрали и исполнения резисторов (высоковольтные, низковольтные). На рис. 1 представлены наиболее распространенные их варианты.

Высоковольтный заземляющий резистор может подключаться либо к нейтрали обмотки высшего напряжения нейтралеобразующего трансформатора TR 6 – 35/0,4 кВ (рис. 1, а, б), либо непосредственно к нейтрали обмотки силового трансформатора T , питающего данную сеть (рис. 1, в). Указанные нейтралеобразующие трансформаторы могут быть присоединены как к сборным шинам подстанций (рис. 1, а), так и к выводам соответствующих обмоток питающих трансформаторов (рис. 1, б). Второй способ предпочтительнее, так как дает возможность селективно выявлять однофазные замыкания на землю на сборных шинах 6 – 35 кВ и в цепи обмотки того же напряжения питающего трансформатора [5].

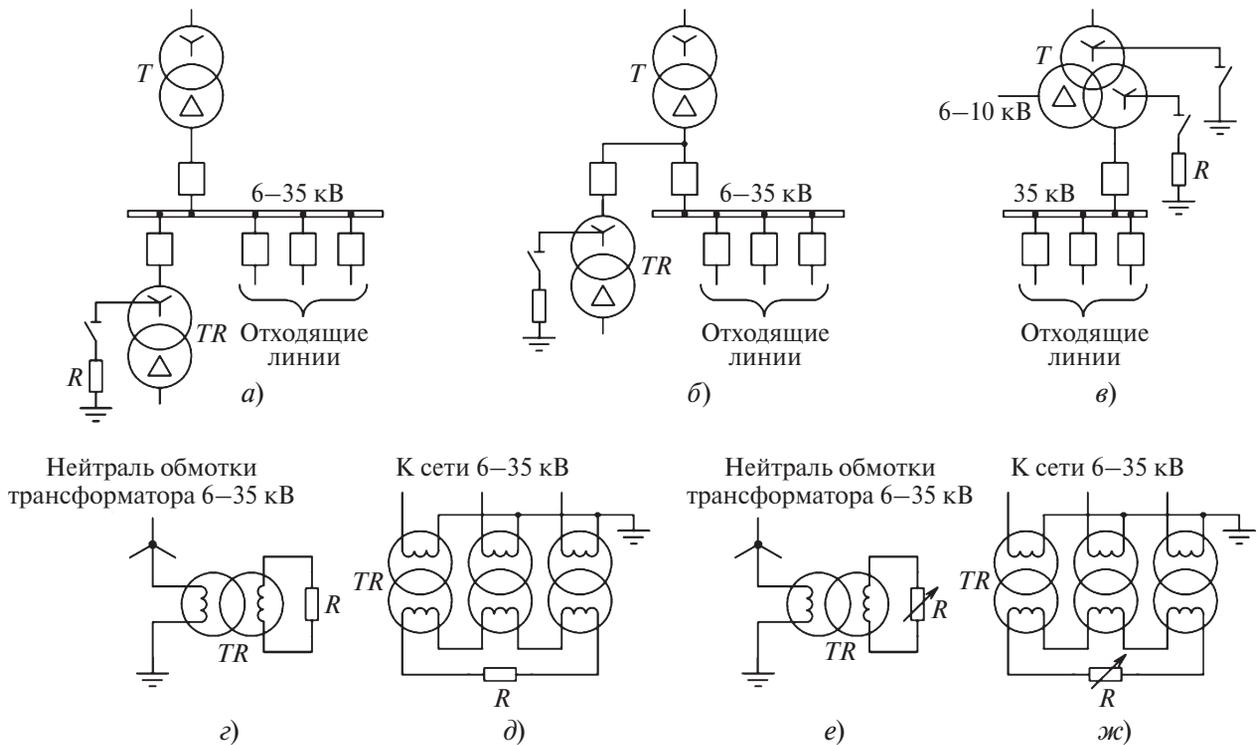


Рис. 1. Схемы включения резисторов в нейтраль сети 6 – 35 кВ

В качестве нейтралеобразующих трансформаторов могут быть использованы серийно выпускаемые промышленностью:

силовые масляные трансформаторы со схемой соединения обмоток Y_0/Δ ;

специальные заземляющие фильтры типа ФЗМ со схемой соединения обмотки Z_0 (на рис. 1 не показаны). Их применение предпочтительнее вследствие более низких потерь мощности в режимах холостого хода и КЗ.

Низковольтный заземляющий резистор можно подключать к вторичной обмотке однофазного понижающего трансформатора (рис. 1, з), к разомкнутому треугольнику вторичных обмоток трех однофазных понижающих трансформаторов (рис. 1, д). На базе данных схем возможно также построение схем (рис. 1, е, ж), связанных с управлением резистора. Они необходимы для обеспечения целенаправленного регулирования значения тока замыкания на землю при изменении конфигурации сети.

Уровень перенапряжений

Известно, что в сетях среднего напряжения однофазные замыкания на землю составляют 70 – 80 % общего числа повреждений. В сетях с изолированной нейтралью на начальной стадии развития повреждения большинство таких замыканий имеет дуговой характер.

Процесс горения дуги — неустойчивый. Окончательному ее погасанию предшествует несколько попыток гашения при переходе тока через нулевое значение с последующим повторным замыканием дуги. Такая перемежающаяся дуга — причина развития колебаний при каждом ее обрыве и зажигании дуги, что обуславливает дуговые перенапряжения на неповрежденных фазах. При этом емкости здоровых фаз сохраняют свой заряд в связи с отсутствием путей их разряда. В результате появляется напряжение на нейтрали, и при последующих пробоях уровень напряжения возрастает [6].

В сети с резистивным заземлением нейтрали заряд на нейтрали в режиме перемежающегося замыкания не накапливается, второй и последующие импульсы тока замыкания не увеличиваются по сравнению с первым. Воздействие импульсного тока замыкания на место повреждения во время перемежающегося режима горения дуги заметно меньше, чем в режиме изолированной нейтрали. Запасенная в емкостях энергия расходуется при этом на нагрев резистора. Для обеспечения полного разряда емкостей фаз за время t_{Π} (время между ближайшими замыканиями), равное 0,008 – 0,010 с, сопротивление резистора выбирают из условия

$$I_R \geq I_C. \quad (2)$$

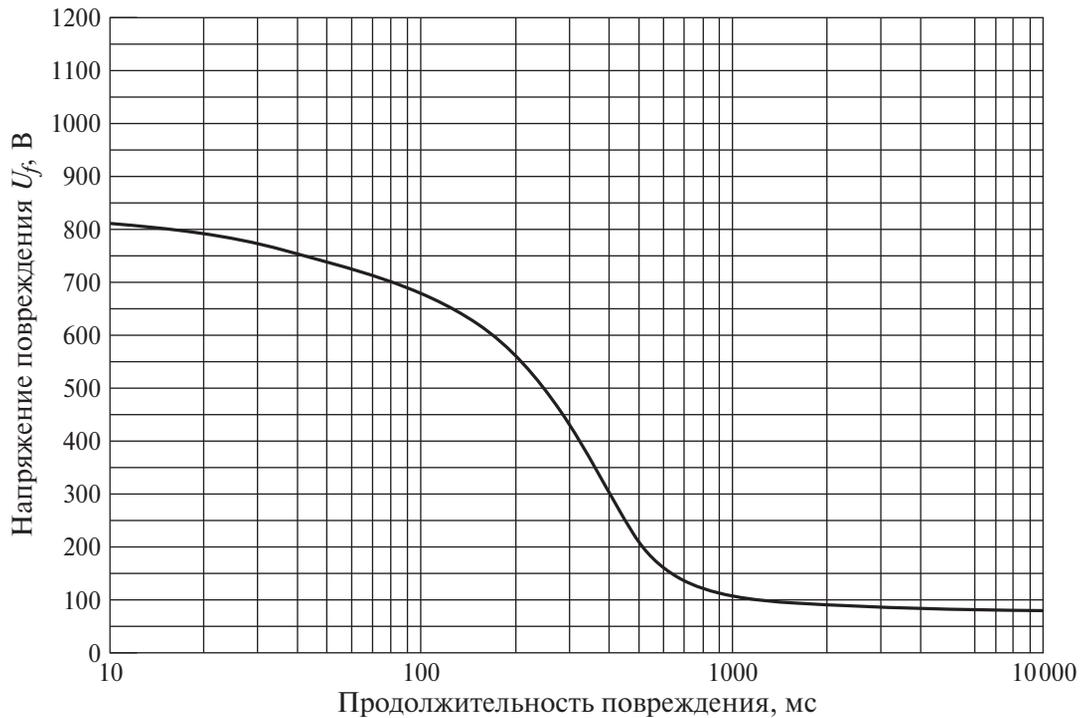


Рис. 2. Кривая зависимости допустимого напряжения замыкания от максимальной длительности замыкания на землю в сети выше 1 кВ

Таким образом, оба вида резистивного заземления нейтрали (высокоомное и низкоомное) способствуют ограничению дугowych перенапряжений до более безопасных уровней (250 % номинального значения) [2].

Электробезопасность

В главе 1.7 ПУЭ 7-го издания [1] электроустановки выше 1 кВ в отношении мер электробезопасности разделяются на:

электроустановки в сетях с глухозаземленной или эффективно заземленной нейтралью;

электроустановки в сетях с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор или резистор нейтралью.

Однако в данном документе отсутствуют технические требования к заземляющим устройствам электроустановок напряжением выше 1 кВ для сети с заземлением нейтрали через резистор, как это сделано для электроустановок напряжением выше 1 кВ в сетях с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью. Так, для сети с изолированной либо заземленной через дугогасящий реактор (сеть с компенсацией емкостных токов) нейтралью требуется, чтобы значение сопротивления растеканию заземляющего устройства (ЗУ) $R_{ЗУ}$ рассчитывалось по формуле [1]

$$R_{ЗУ} \leq 250/I_3 \quad (\text{но не более } 10 \text{ Ом}), \quad (3)$$

где I_3 — расчетный ток замыкания на землю, А.

Для определения расчетного тока даны рекомендации для сети как с компенсацией емкостного тока, так и без нее. В частности, для последней в качестве расчетного тока принимается ток замыкания на землю. Необходимо отметить, что согласно ПУЭ 6-го издания [4] формула (3) справедлива для ЗУ, предназначенных только для электроустановок выше 1 кВ. В [4] также установлены требования к $R_{ЗУ}$ в случае, когда ЗУ используется одновременно для электроустановок до 1 кВ:

$$R_{ЗУ} \leq 125/I_3 \quad (\text{но не более } 10 \text{ Ом}). \quad (4)$$

На наш взгляд, технические требования к ЗУ данных сетей в [4] трактуются наиболее правильно, хотя между ними и требованиями ГОСТ Р 50571-4-44—2011 [7] имеются расхождения. В [7] ограничивается значение напряжения на общем ЗУ ($U_{ЗУ}$), предназначенном для электроустановок напряжением до и выше 1 кВ, в зависимости от максимальной длительности замыкания на землю в сети выше 1 кВ. Согласно [7] (рис. 2) при напряжении замыкания на землю, равном 125 В (как принято по [4]), электроустановка должно отключаться за время не более 0,8 с, в противном случае требуется, чтобы ЗУ сети

до 1 кВ было выполнено отдельно от ЗУ сети выше 1 кВ. Технически данное требование выполнить довольно сложно (электроустановки до и выше 1 кВ могут находиться в непосредственной близости друг от друга, в одном помещении), а иногда даже невозможно (для комплектных трансформаторных подстанций промышленного типа, представляющих собой единую конструкцию трансформатора 6–10 кВ и РУ 0,4 кВ). Таким образом, приходится констатировать, что нормативные требования перечисленных документов отличаются, а это затрудняет решение вопросов электробезопасности для электроустановок напряжением выше 1 кВ в сетях с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью.

Релейная защита электроустановок с малыми токами замыкания на землю в большинстве случаев не действует на отключение той части установки, в которой произошло однофазное замыкание на землю, вследствие чего последнее может быть продолжительным. Длительно будет существовать и напряжение $U_{3У}$ на заземляющем устройстве, в результате чего увеличивается вероятность прикосновения людей к частям установки, оказавшимся под напряжением, равным $U_{3У}$ [8]. С учетом указанного в ПУЭ нормируется допустимое значение этого напряжения: в формулах (3) и (4) оно составляет соответственно 250 и 125 В при возникновении ОЗЗ в зависимости от напряжения электроустановки, для которых проектируется данное ЗУ.

Поскольку диапазон токов замыкания на землю и принцип действия РЗиА для сети с заземлением нейтрали через высокоомный резистор такие же, как и для сети с изолированной нейтралью, то и условия электробезопасности данных установок также схожи. Что касается сети с заземлением нейтрали через низкоомный резистор, то электробезопасность в ней выше, чем в сети с изолированной и заземленной через дугогасящий реактор нейтралью при возникновении ОЗЗ. Это связано с тем, что релейная защита электроустановок в такой сети действует всегда на отключение той части установки, в которой произошло однофазное замыкание на землю. Поэтому эти электроустановки характеризуются кратковременным появлением потенциала на заземляющих устройствах при замыкании на землю, благодаря чему уменьшается вероятность прикосновения людей к частям установок, кратковременно оказавшихся под напряжением $U_{3У}$.

На основе указанного выше можно сделать вывод о том, что для сетей с заземлением нейтрали через высокоомный и низкоомный резисторы возможно применение формул (3) и (4) для определения сопротивления растеканию тока заземляющего устройства $R_{3У}$ и обеспечения электробезопасности электроустановок. В качестве расчетного тока необходимо принимать полный ток замыкания на землю (поскольку данные сети относятся к сетям без компенсации емкостных токов).

Если выполнить ЗУ по норме на допустимое сопротивление заземляющего устройства невозможно, то защитные мероприятия при низкоомном заземлении нейтрали можно осуществить на основе системы нормирования условий электробезопасности по допустимому напряжению прикосновения. В этом случае электробезопасность обеспечивается за счет быстрого отключения поврежденной линии, что позволяет в соответствии с ГОСТ 12.1.038 [9] принимать для человека повышенные значения напряжения прикосновения по сравнению с напряжением при длительном его воздействии. Расчет по допустимому напряжению прикосновения довольно сложен, поскольку необходимо построить зависимости распределения потенциала на территории и по периметру размещения электроустановки [10], а это невозможно без применения мощных компьютеров и специально разработанных программ.

Организация релейной защиты от замыканий на землю

С целью выбора принципов работы РЗиА в сетях с высокоомным и низкоомным заземлением нейтрали необходимо рассмотреть влияние резистора в нейтрали на протекание переходного процесса при ОЗЗ.

В [11] приведены кривые тока замыкания для первого импульса в сетях с изолированной и резистивной нейтралью для емкостного тока $I_C = 4,5$ А (рис. 3). Введем величину $I_{R*} = I_R/I_C$ — относительное целесообразное значение активной составляющей тока однофазного замыкания на землю. Видно, что на процесс горения перемежающейся дуги незначительно влияет режим резистивного заземления при $I_{R*} = 1$. Кривая тока замыкания на рис. 3, б практически не изменяется (амплитуда тока увеличивается незначительно, частота и момент перехода через нуль t_T остаются почти неизменными) по сравнению с кривой тока замыкания в сети с изолированной нейтралью (рис. 3, а). При $I_{R*} = 2$

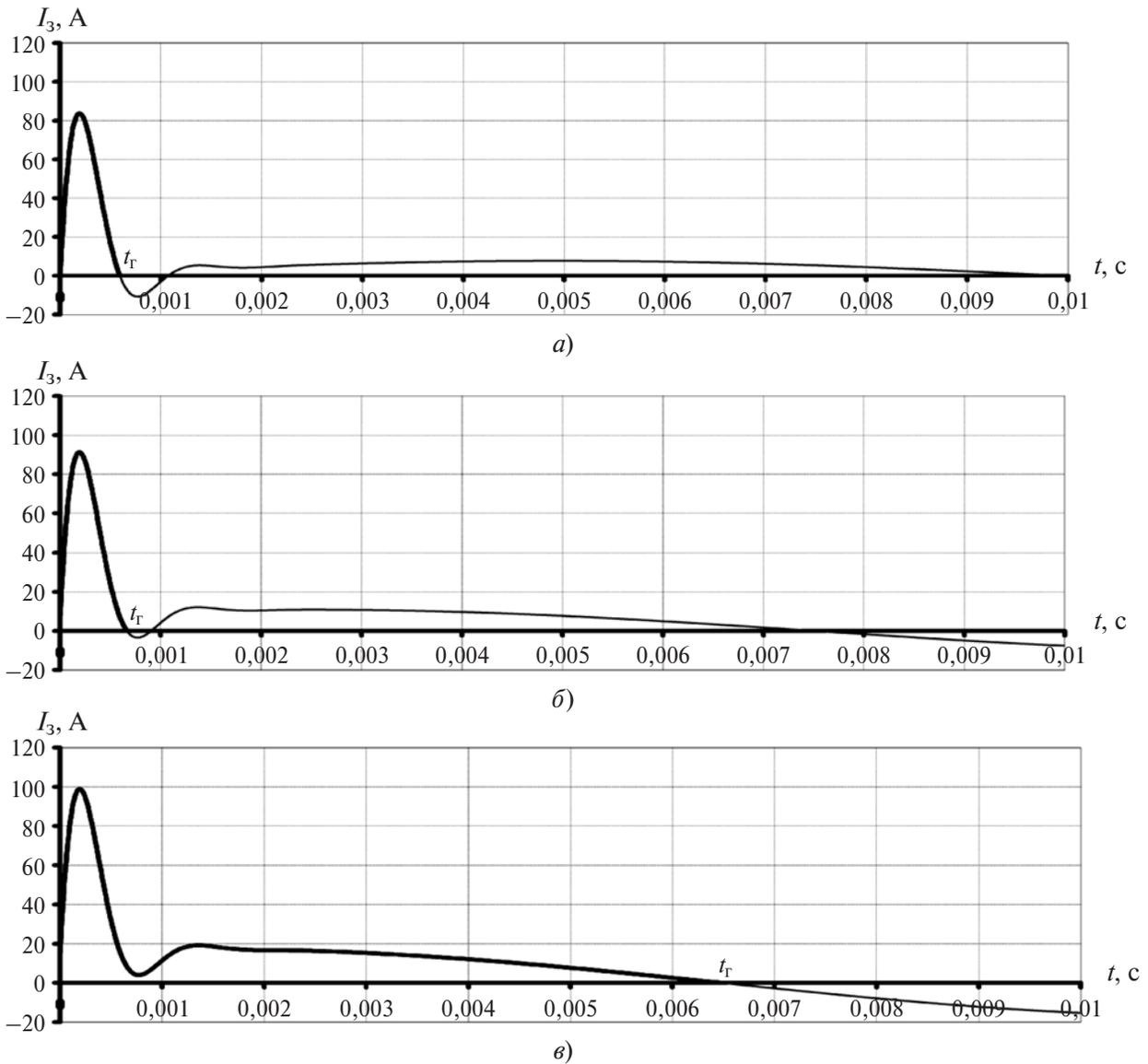


Рис. 3. Кривые тока замыкания в сети с изолированной нейтралью (а) и резистивно-заземленной нейтралью с $I_{R^*} = 1$ (б), $I_{R^*} = 2$ (в)

(рис. 3, в) характер изменения тока становится качественно другим. Ток замыкания переходит нулевое значение через 0,006 – 0,007 с на составляющей 50 Гц, интеграл тока увеличивается более чем вдвое. Кривая тока замыкания приобретает заметную принужденную активно-емкостную составляющую с преобладанием активной, что, естественно, изменяет характер горения дуги. При дальнейшем увеличении активной составляющей в токе ОЗЗ произойдет переход перемежающегося режима горения дуги с ее гашением на высокочастотной составляющей в режим с гашением на принужденной составляющей, и дуга станет устойчивой. Этот переход возможен уже при наложении активного тока $I_{R^*} = 4 \div 6$, поэтому дальнейший рост I_R приво-

дит лишь к увеличению размеров повреждения [11].

В сетях с высокоомным заземлением нейтрали защиты от замыканий на землю, как правило, должны работать на обнаружение и предупреждение, а не на немедленное отключение. Это связано со следующим:

суммарный ток замыкания на землю ограничен до очень низкого уровня;

при малой активной составляющей в токе ОЗЗ действие РЗиА не всегда селективно при дуговых замыканиях на землю (прерывистый и неустойчивый характер дуги осложняет выделение первой гармоники в спектре нулевой последовательности — это было отмечено в ходе анализа кривой тока при $I_{R^*} = 1$).

Действие РЗиА на отключение при ОЗЗ для высокоомного заземления нейтрали возможно только при уровне емкостного тока на землю, составляющем единицы ампер (что бывает довольно редко). Это обусловлено тем, что тогда можно выбрать значение активной составляющей тока $I_{R^*} = 4 \div 6$, обеспечивающее условия надежного срабатывания защит от ОЗЗ, и не выйти за пределы нормируемого полного тока замыкания на землю, характерного для данной сети. При других значениях I_{R^*} защита может срабатывать неправильно по вышеуказанным причинам. Последствия при этом могут быть более серьезными, чем при действии РЗиА на сигнал.

Целесообразное значение активной составляющей тока ОЗЗ для высокоомного заземления нейтрали выбирается из условия

$$I_{R^*} \geq \sqrt{(I_{c.з.max} k_{ч.min} / I_C)^2 - 1}, \quad (5)$$

где I_C — наибольшее значение естественного емкостного тока ОЗЗ сети, А; $I_{c.з.max}$ — наибольший из токов срабатывания защит от ОЗЗ в рассматриваемой сети, А; $k_{ч.min}$ — наименьшее допустимое нормативными документами значение коэффициента чувствительности защиты от ОЗЗ.

Таким образом, при заземлении нейтрали через высокоомный резистор (как и в сети с изолированной нейтралью), как правило, крайне сложно быстро и селективно выявить режим однофазного замыкания, что в свою очередь ведет к усложнению и удорожанию релейной защиты от ОЗЗ.

В сетях с низкоомным заземлением нейтрали защита от замыканий на землю должна действовать на отключение поврежденного фидера с минимально возможной выдержкой времени (как это принято для двухфазного и трехфазного КЗ), чтобы не допустить разрушения оборудования от значительных токов и обеспечить электробезопасность персонала. При указанном заземлении нейтрали в режиме ОЗЗ по поврежденному присоединению протекает ток, составляющий десятки и сотни ампер [12]. При таких токах замыкание носит устойчивый характер, причем активная составляющая в токе ОЗЗ достаточно большая. Все это позволяет организовать простую токовую защиту с необходимой чувствительностью и селективным действием на отключение поврежденного участка. На рис. 4 показан путь протекания активной составляющей тока, обеспечивающего селективную работу РЗиА.

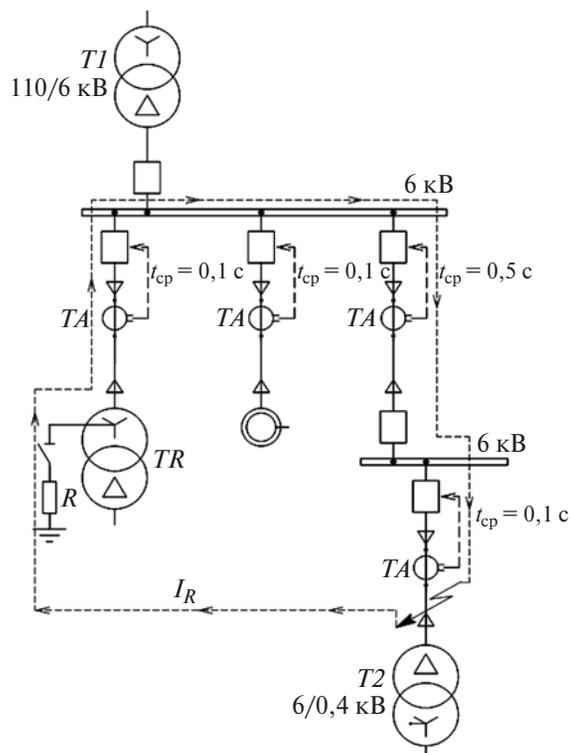


Рис. 4. Путь протекания активной составляющей тока, обеспечивающего селективную работу РЗиА при ОЗЗ: ТА — трансформаторы тока

Целесообразное значение активной составляющей тока ОЗЗ для низкоомного заземления нейтрали выбирается из условия надежного срабатывания защит от ОЗЗ:

$$I_{R^*} \geq 4 \div 6 \quad (6)$$

или

$$I_{R^*} \geq \frac{I_{c.з.max} k_{ч.min}}{I_C}. \quad (7)$$

Такое значение дополнительно накладываемого активного тока является достаточным для сетей с емкостными токами, не превышающими допустимых.

В случае если ток в некомпенсированной сети выше допустимого значения при устойчивом горении заземляющей дуги, очевидно, нет необходимости в столь значительном увеличении тока в месте повреждения. Вопрос о значении заземляющего резистора в этом случае требует дополнительных исследований.

Для обеспечения безусловной селективности простых токовых защит от замыканий на землю в компенсированных сетях возможно использование специальной автоматики наложения на место повреждения достаточного

активного тока на время, необходимое для срабатывания защиты [13, 14].

Надежность электроснабжения электроприемников

Вопросы надежности электроснабжения электроприемников непосредственно связаны с обеспечением его бесперебойности. В режиме ОЗЗ бесперебойность электроснабжения определяется действием релейной защиты при данном повреждении сети (на отключение, на сигнал).

Если схема электроснабжения достаточно надежна (несколько независимых источников питания, наличие устройств АВР и т. д.), что характерно для электроприемников первой и, как правило, второй категорий надежности, то необходимо использовать режим резистивного заземления нейтрали с действием на отключение поврежденного элемента при ОЗЗ (низкоомное резистивное заземление). Отключение и своевременный ремонт поврежденного элемента повышают надежность функционирования всей сети.

Для электроприемников второй и третьей категорий надежности с питанием от одного независимого источника, а также электроприемников, для которых непрерывность технологического процесса исключительно важна, следует рассмотреть вопрос о целесообразности сохранения режима ОЗЗ и применения режима заземления нейтрали с действием на сигнал (высокоомное резистивное заземление), так как длительное существование режима ОЗЗ в сети может привести к его переходу в многофазные и двойные замыкания на землю с отключением поврежденных элементов.

Выводы

1. При выборе режима резистивного заземления нейтрали как на стадии проектирования, так и в условиях эксплуатации необходим всесторонний системный анализ основных факторов, влияющих на надежность работы оборудования и безопасность персонала.

2. Следует провести дополнительные исследования по выбору значения накладываемой активной составляющей тока от заземляющего резистора при устойчивом горении заземляющей дуги в сети с емкостными токами, превышающими нормируемые, по-

скольку от этого зависят рекомендации по выбору заземляющего резистора для низкоомного заземления.

3. Нужно разработать единый стандарт, в котором должны учитываться положения действующих законов и стандартов, специфика и техническое состояние сетей и электрооборудования, существующая элементно-техническая база, опыт аналогичных научно-технических разработок, в том числе зарубежных.

Список литературы

1. **Правила** устройства электроустановок. 7-е изд. — М.: Кнорус, 2009.
2. **IEEE Std 142 2007**. Recommended practice for grounding of Industrial and Commercial Power.
3. **Титенков С.** 4 режима заземления нейтрали в сетях 6 – 35 кВ. Изолированную нейтраль объявим вне закона. — *Новости Электротехники*, 2003, № 5(23).
4. **Правила** устройства электроустановок. 6-е изд. — М.: Госэнергонадзор, 2000.
5. **Заземление** нейтрали в промышленных установках 6 – 35 кВ. — М.: ВНИПИ Тяжпромэлектропроект, 1991.
6. **СТО Газпром 2-1.11-070–2006**. Методические указания по выбору режима заземления нейтрали в сетях напряжением 6 и 10 кВ дочерних обществ и организаций ОАО “Газпром”.
7. **ГОСТ Р 50571-4-44–2011**. Требования по обеспечению безопасности. Защита от отклонений напряжения и электромагнитных помех.
8. **Баптиданов Л. Н., Тарасов В. И.** Электрооборудование электрических станций и подстанций. Т. 2. — Л.-М.: Энергия, 1960.
9. **ГОСТ 12.1.038**. Предельно допустимые значения напряжения прикосновения и токов.
10. **Фишман В. С.** Способы заземления нейтрали в сетях 6 – 35 кВ. — *Новости Электротехники*, 2008, № 2(50).
11. **Рыжкова Е. Н.** О влиянии параметров цепи тока замыкания на режимы горения заземляющих дуг. — *Вестник МЭИ*, 2008, № 4.
12. **СТП 09110.20.187–09**. Методические указания по заземлению сетей 6 – 35 кВ Белорусской энергосистемы через резистор. — Минск: НИПИ РУП “Белэнергосетьпроект”, 2009.
13. **Рыжкова Е. Н., Фомин М. А., Садовская К. О.** О практической возможности изменения режима нейтрали сетей с малыми токами замыкания на землю. — *Промышленная энергетика*, 2012, № 7.
14. **Рыжкова Е. Н., Цырук С. А.** Системы адаптивного управления режимом нейтрали сетей 6 – 35 кВ (Тр. второй Всероссийской науч.-практической конф. “Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем”). — М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

RyzhkovaYN@mpei.ru