

УДК 621.3

*Галямов Азат Абузарович,
кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры ИТМ УГНТУ,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,*

Уфа, Россия

*Нурлыев Камиль Сабирьянович,
студент кафедры «Электротехника и электрооборудование
предприятий»,*

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

*Хаматгареев Ильназ Ильшатович,
студент кафедры «Электротехника и электрооборудование
предприятий»,*

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

*Сибогатов Ильдар Маратович,
студент кафедры «Электротехника и электрооборудование
предприятий»,*

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Уфа, Россия

**ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЛЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЗАЩИТ ОТ
ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СЕТЯХ**

Аннотация: В статье исследуется проблема обеспечения селективности защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в электрических сетях 6–35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью. Авторы анализируют работу цифровых устройств серии «Альтра» и выявляют ограничения традиционных методов согласования защит по току и напряжению нулевой последовательности. Предложены практические рекомендации по улучшению селективности, включая динамическое изменение коэффициента возврата по напряжению нулевой последовательности и использование блокировок на основе бинарных сигналов между смежными устройствами. Показано, что применение этих мер позволяет снизить время срабатывания защит и минимизировать ущерб от перенапряжений и перерывов в электроснабжении. Результаты работы могут быть использованы для повышения надежности и селективности релейной защиты в сетях сложной конфигурации.

Ключевые слова: электрическая сеть, селективность работы защиты, однофазное замыкание на землю, напряжение нулевой последовательности, ток нулевой последовательности, цифровые устройства «Альтра», распределительный пункт.

Annotation: This article examines the problem of ensuring selectivity of single-phase earth fault (SEF) protection in 6–35 kV electrical networks with isolated or compensated neutral. The authors analyze the operation of digital devices of the Altra series and identify the limitations of traditional methods of coordinating residual current and residual voltage protection. Practical recommendations for improving selectivity are proposed, including dynamically changing the residual voltage return ratio and using blocking based on binary signals between adjacent devices. It is shown that the use of these measures reduces protection response time and minimizes damage from overvoltages and

power outages. The results of this study can be used to improve the reliability and selectivity of relay protection in networks with complex configurations.

Key words: *electric network, selectivity of protection operation, single-phase earth fault, zero sequence voltage, zero sequence current, Altra digital devices, distribution point.*

Актуальность. Одной из актуальных проблем в сложной электрической сети с изолированной (компенсированной) нейтралью является селективное определение поврежденного элемента при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ). Для селективной и надежной работы защит от однофазных замыканий на землю в сложных сетях с изолированной (компенсированной) нейтралью помимо информации о токе нулевой последовательности присоединения, информации о фазных напряжениях и напряжении нулевой последовательности электрической сети, необходима информация о срабатывании устройств защиты от ОЗЗ смежных элементов.

Цель. Исследовать разработку рекомендаций по расчету параметров срабатывания устройств релейной защиты от ОЗЗ, которые обеспечивали бы его селективную и надежную работу в электрических сетях с изолированной нейтралью сложной конфигурации.

Методы исследования. В качестве метода исследования проблематики селективности работы защит от однофазных замыканий на землю в электрических сетях выбран анализ в совокупности с изучением и обобщением соответствующей информации, экспериментальные методы и методы моделирования электрических сетей и защит.

Результаты. Установлено, что селективное выключение поврежденного участка электрической сети по ОЗЗ с минимальной выдержкой времени существенно уменьшает время действия перенапряжений на элементы электрической сети, что в свою очередь экономит ресурс изоляционных характеристик оборудования. Доказано, что

для уменьшения степени селективности времени срабатывания можно использовать динамическое изменение коэффициента возврата измерительного органа по напряжению нулевой последовательности.

Введение. Одной из проблем в электрической сети с изолированной (компенсированной) нейтралью является селективное определение поврежденного элемента при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ). Разработаны методы и средства, решающие данную проблему, например [1, 2, 3]. Проблема селективного определения поврежденного элемента по ОЗЗ в электрической сети с изолированной (компенсированной) нейтралью анализируется в рамках характеристик сети среднего напряжения с изолированной нейтралью и условий возникновения ОЗЗ (состояние изоляции и величина сопротивления замыкания) на составляющие нулевой последовательности напряжения шин среднего напряжения трансформаторной подстанции, ток замыкания, токи поврежденной линии и токи других неповрежденных линий электропередачи, подключенных к шинам трансформаторной подстанции.

Для селективной и надежной работы защит от ОЗЗ в сетях с изолированной (компенсированной) нейтралью необходима информация о токах и напряжении нулевой последовательности электрической сети. Согласовать селективную работу устройств защиты от ОЗЗ последовательных участков электрической сети только по току и напряжению нулевой последовательности нет возможности.

Как показал опыт эксплуатации, большинство ОЗЗ в сетях с изолированной (компенсированной) нейтралью являются дуговыми (70–90 % всех ОЗЗ). Даже стойкие ("металлические") ОЗЗ начинаются с дуговых замыканий разной продолжительности. Режим дуговых ОЗЗ опасен для изоляции всей электрической сети из-за наличия в ней перенапряжений с крутыми фронтами волн. При возникновении дугового ОЗЗ также могут

возникать феррорезонансные явления, для которых характерно значительное повышение фазных напряжений сети, что может вызвать пробой изоляции оборудования. При возникновении феррорезонанса в первую очередь из строя выходят трансформаторы напряжения, также могут повреждаться кабели электрически связанной сети [4]. Кроме того, такие перенапряжения вызывают сильную деградацию и старение изоляции. Учитывая вышеизложенное, защита от возникновения ОЗЗ в сетях с изолированной (компенсированной) нейтралью должна действовать на отключение поврежденного элемента с минимальной возможной выдержкой времени [3]. В электрических сетях с изолированной (компенсированной) нейтралью часто возникают ОЗЗ, сопровождающиеся перемежающимся замыканием - типом повреждения в электросети, при котором заземляющая дуга, возникающая при ОЗЗ, многократно гаснет и самовосстанавливается, что приводит к опасным для сети перенапряжениям и перезарядке конденсаторов фаз. В данном случае в большинстве случаев изоляция в месте повреждения самовосстанавливается (или восстанавливается после снятия напряжения). В случае использования быстродействующей релейной защиты выключенное ею присоединение, в котором восстановилась изоляция, может вводиться в работу. Для этого целесообразно применить автоматическое повторное включение, осуществляющее включение элемента, предварительно выключенного защитой ОЗЗ в электрической сети с изолированной (компенсированной) нейтралью [5]. Это позволит уменьшить ущерб от недоотпуска электроэнергии за счет уменьшения времени обесточивания потребителей, которые выключались защитой при ОЗЗ.

Цель исследования статьи - разработать рекомендации по расчету параметров срабатывания устройств релейной защиты от ОЗЗ, которые обеспечивали бы его селективную и надежную работу в электрических сетях с изолированной нейтралью сложной конфигурации.

В рамках решение цели данной статьи было необходимо выявить особенности, которые необходимо учитывать для расчета параметров срабатывания устройств релейной защиты в такой сети при однофазных замыканиях на землю. Также была поставлена задача исследовать процессы в сложной электрической сети с изолированной (компенсированной) нейтралью при возникновении однофазных замыканий на землю.

Результаты. Как известно, ОЗЗ в электрических сетях с изолированной нейтралью приводят к образованию ненормальных режимов работы. При таких режимах напряжение на неповрежденных фазах электрически связанной сети может достигать линейного значения, что приводит к более интенсивному старению изоляции линии электропередачи (ЛЭП), однако потребители в такой электрической сети продолжают получать питание, поэтому почти все ЛЭП напряжением 6-35 кВ выполнены с изолированной нейтралью. Именно на таких отечественных ВЛ с каждым годом наблюдается тенденция увеличения количества повреждений, в частности связанных с ОЗЗ, с последующим их переходом в межфазные короткие замыкания, и, как следствие, к увеличению количества и продолжительности обесточивания потребителей. Такие обесточивания ухудшают показатели надежности электроснабжения по метрикам SAIDI (средняя продолжительность перебоев), SAIFI (средняя частота перебоев) и ENS (общая энергия, недопоставленная потребителям) [6], которые используется в странах Европейского Союза и в Российской Федерации. Существует множество путей улучшения показателей надежности. Одни направлены на повышение структурной надежности электрической сети, а другие – надежности электроснабжения [7]. Как правило, первые должны применяться для новых электрических сетей, а вторые – для существующих, которые находятся в эксплуатации в России более 50 лет. В условиях отсутствия инвестиций для полной замены существующих электрических сетей предпочтение должно отдаваться таким путям повышения показателей

надежности электроснабжения потребителей, которые будут менее затратными и наиболее эффективными. Для выбора таких путей необходимо знать распределение повреждений в электрических сетях 6-10кВ и их влияние на эксплуатационные показатели надежности.

При эксплуатации электрических сетей энергокомпаний, занимающиеся распределением электрической энергии по сетям 0,38-150кВ, в соответствии с [8] обязаны собирать информацию об обнаруженных дефектах и повреждениях в элементах электрических сетей 0,38-20кВ. Информация по выявленным дефектам в электрических сетях собирается обслуживающим персоналом во время периодических и внеочередных осмотров и заносится в так называемые листки обзора с последующей систематизацией по структурному подразделению в журнале дефектов. Собранная информация должна быть обработана с разбивкой на наиболее массовые виды повреждений:

- повреждение штыревой изоляции;
- обрыв провода (или связки провода к изолятору);
- пробой вентильного разрядника;
- другие причины;
- не обнаружено (повреждение самоустранилось после автоматического повторного включения (АПВ) и ручного включения (РПВ)).

К другим причинам могут быть отнесены единичные обесточивания электрической сети из-за:

- падения опор;
- повреждения траверсы;
- повреждения трансформаторов тока;
- повреждения кабельных вставок;
- повреждения силового трансформатора на ТП 10/0,4кВ;
- повреждений в абонентской сети;
- птиц и диких животных.

Для уменьшения ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям, которые выключались защитой при однофазном замыкании на землю, предлагается их включать устройствами автоматического повторного включения [9]. Это в первую очередь касается потребителей, подсоединенных к шинам подстанций кабелями с бумажной маслопропитанной изоляцией.

Согласно ПУЭ [10] при возникновении ОЗЗ в электрических сетях с изолированной (компенсированной) нейтралью защиты должны действовать на сигнал или отключение. В связи с внедрением цифровых технологий в устройстве РЗА удалось существенно улучшить характеристики защиты, в частности, их чувствительность и селективность [11]. Поэтому в электрических сетях Российской Федерации защиту от ОЗЗ все чаще переводят с действием на отключение поврежденного участка.

В Российской Федерации для защиты электрических сетей с изолированной (компенсированной) нейтралью от ОЗЗ применяют микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики серии РС83 и РЗЛ-01. В устройстве РЗЛ-01 реализована ненаправленная защита по току нулевой последовательности, они выпускаются многими производителями в России. Защиты РС83 выпускаются в нескольких версиях, так в версии РС83-В1 реализована двухступенчатая защита от замыканий на землю по напряжению нулевой последовательности, а в версии РС83-АМ реализована 2-х ступенчатая направленная защита от замыканий на землю по току нулевой последовательности. Для устранения недостатка устройств РЗЛ-01 и РС83, которые применяются для защиты только одного присоединения, предлагается внедрить устройство «Альтра» [9], которое обеспечивает комплексный контроль изоляции каждого из присоединений секции шин 6-35 кВ, которое формирует сигналы на выключение аварийного присоединения секции шин после возникновения на нем ОЗЗ, а также регистрирует и запоминает цифrogramмы аналоговых и бинарных сигналов

электроустановок в нормальных режимах и во время аварийных процессов [12-14].

Устройство «Альтра» производится в следующих модификациях:

- «Альтра» 32-332 – содержит 32 аналоговых входов, а именно напряжения $u_A, u_B, u_C, 3u_0$ и 28 токов нулевой последовательности $3i_0$ присоединений;

- «Альтра» 32-316 – содержит 16 аналоговых входов, а именно напряжения $u_A, u_B, u_C, 3u_0$ и 12 токов нулевой последовательности $3i_0$ присоединений;

- «Альтра» 32-316x2 – устройство определения присоединения с ОЗЗ на двух секциях шин, содержащей 32 аналоговых входов, а именно напряжения $u_A, u_B, u_C, 3u_0$, 1 секцию шин, $u_A, u_B, u_C, 3u_0$, 2 секции шин и 24 тока нулевой последовательности $3i_0$ подсоединений 1 и 2 секций шин.

Это устройство обеспечивает комплексный контроль изоляции каждого подсоединения секции шин 6-35 кВ, селективно определяет подсоединение секции шин после возникновения на нем ОЗЗ и формирует сигнал его отключения. Для запуска АПВ обязательно действие устройства защиты по ОЗУ на отключение поврежденного присоединения. Для работы АПВ необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

– пуск АПВ производится только после срабатывания устройства защиты по ОЗУ;

– после включения выключателя подсоединения на определенное время блокируется запуск АПВ;

– действие АПВ должно быть однократным.

Функциональная схема, реализующая работу АПВ устройства «Альтра», приведена на рис. 1. Схема показана для одного присоединения.

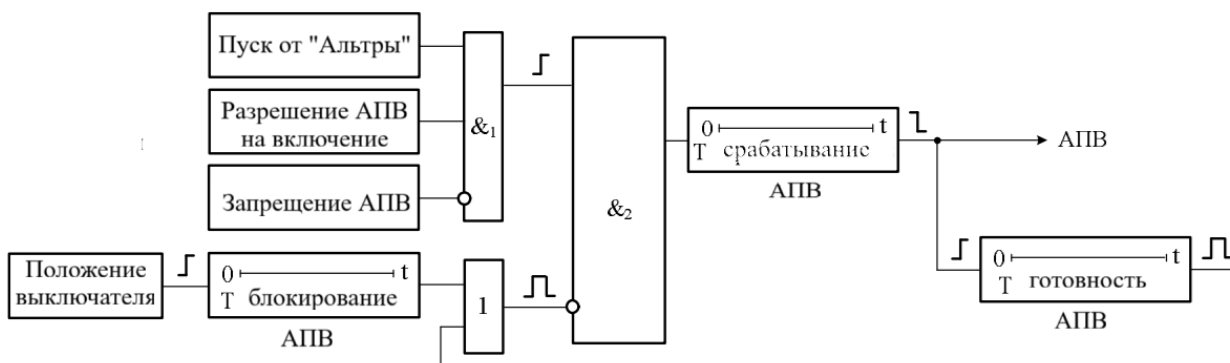


Рисунок 1. Функциональная схема работы АПВ устройства «Альтра»

Figure 1. Functional diagram of the Altra APV device

Для организации АПВ необходимо контролировать состояние выходных реле устройства защиты по ОЗУ, действующих на отключение выключателей присоединений и состояние выключателей этих присоединений.

Алгоритм работы устройства основан на анализе координат режима переходного процесса в электрической сети сразу же после возникновения в ней ОЗЗ. Для этого осуществляется анализ цифrogramм напряжения нулевой последовательности, фазных напряжений сети и токов нулевой последовательности подсоединений, охваченных устройством Альтра. Такой подход позволяет эффективно применять устройства «Альтра» как в сетях с изолированной, так и в сетях с компенсированной нейтралью.

Рассмотрим это на примере сети, рис. 2. Так, после возникновения ОЗЗ в месте К1 (рис. 2) напряжение нулевой последовательности $3U_0$ появляется как на шинах подстанции "А", так и на шинах подстанций "Б" и "В". Поэтому сработают максимальные пусковые органы напряжения нулевой последовательности $3U_0$ всех устройств Альтра, размещенных в этой сети. Ток замыкания к месту возникновения ОЗЗ будет протекать по линии Л2 и несколько больше – по линии Л21 протекают токи нулевой последовательности, обусловленные емкостью включенного на данный момент к шинам подстанции "В" другого оборудования). Количественно

различить эти токи по величине и выбрать различные установки по току срабатывания для устройств А1 и А3 проблематично, а в некоторых режимах невозможно. Так, в случае включенных в шины "В" только линий Л2 и Л21 токи нулевой последовательности по линиям Л2 и Л21 во время ОЗЗ в месте К1 будут почти одинаковыми.

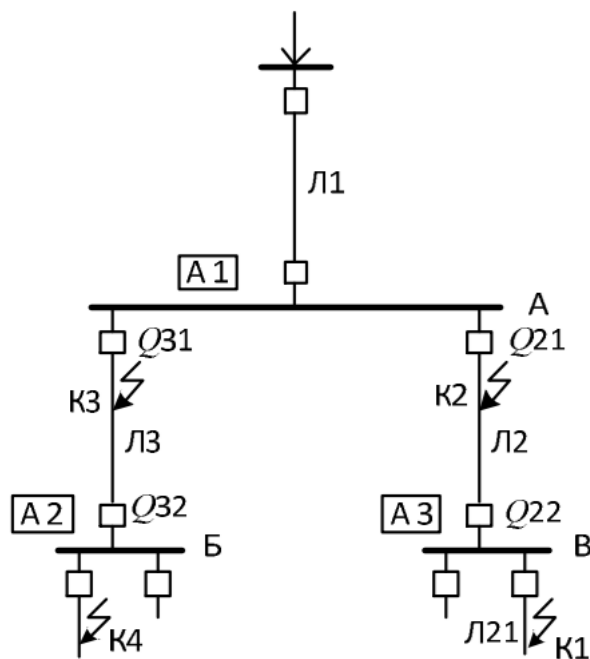


Рисунок 2. Фрагмент сложной сети

Figure 2. A fragment of a complex set

Для согласования работы устройств также нельзя использовать критерий направленности – ток нулевой последовательности обоих устройств А1 и А3 при замыкании в точке К1 протекает от шин в линию. Таким образом, эти две защиты (А1 и А3) для обеспечения их селективной работы можно согласовать только по времени срабатывания.

Как и для максимальных токовых защит от межфазных к.з., выбор времени срабатывания устройств от ОЗЗ начинают для наиболее удаленного от источника питания устройства – устройства, установленного на подстанции "Б" – А2 и устройства, установленного на подстанции "В" – А3.

Выключать присоединение с ОЗЗ нужно после возникновения устойчивого ОЗЗ или после возникновения подряд трех – четырех частичных пробоев. Определяющим для выбора времени срабатывания будет именно второй режим [9], это время можно задавать в пределах 0,1 – 0,3 с.

Время срабатывания устройства защиты следующего элемента (ближе к источнику питания) выбирают исходя большей степени селективности. Так, для схемы рис. 2 время срабатывания устройства А1 выбирают большим из двух условий

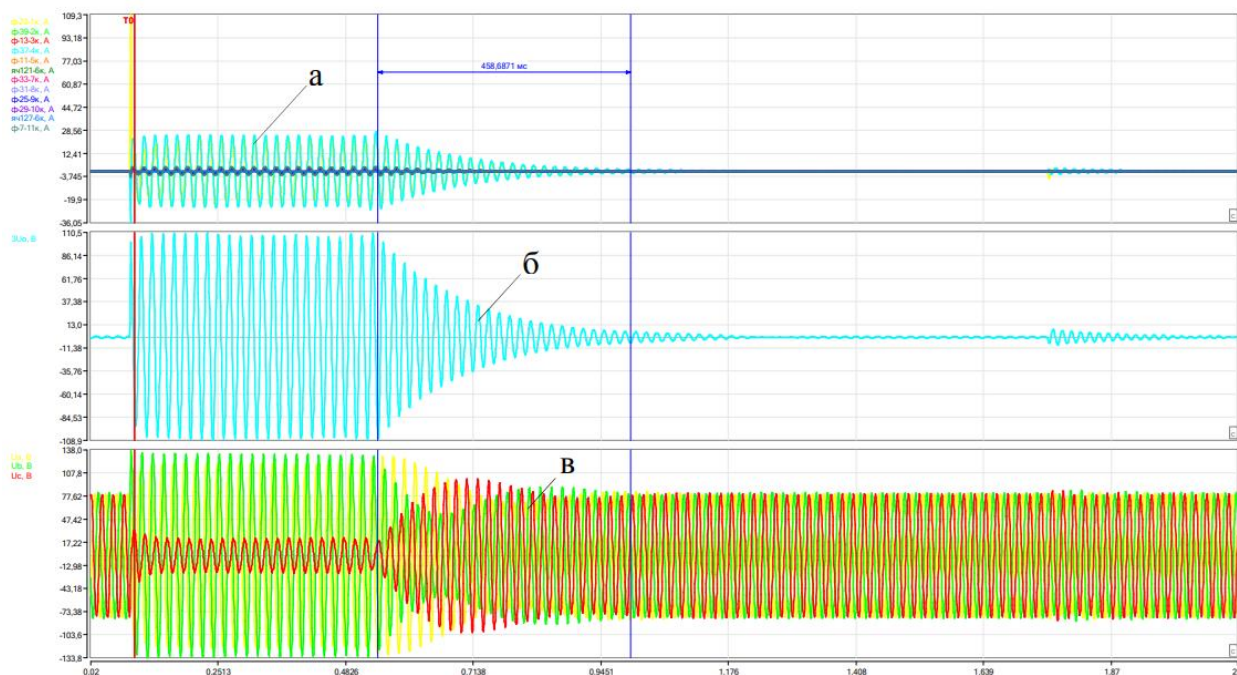
$$t_{с.з.А1} = \max \begin{cases} t_{с.з.А2} + \Delta t; \\ t_{с.з.А3} + \Delta t, \end{cases}$$

где $t_{с.з.А2}, t_{с.з.А3}$ – время срабатывания устройств А2 и А3 соответственно;

Δt – степень селективности.

Величина степени селективности Δt определяется по следующим соображениям. После селективного выключения участка с ОЗЗ, например, отключения линии Л21 устройством А3 после возникновения ОЗЗ в месте К1, напряжение нулевой последовательности на шинах всех подстанций электрически связанной сети сразу не исчезает (рис. 3, б). Как видно из рис. 3 б, после отключения присоединения с ОЗЗ, напряжение нулевой последовательности уменьшается до напряжения возврата измерительного органа (4 В) за время 0,458 с. Поэтому степень селективности для устройств «Альтра» последовательных участков электрической сети, действующих на отключение, должна быть не менее 0,5 с для полученных осциллограмм. Для уменьшения значения степени селективности можно увеличить предельное напряжение измерительного органа защиты, но есть опасность упустить начальный момент возникновения ОЗЗ, что может привести к несрабатыванию устройства «Альтра» после возникновения повреждения в сети. Уменьшение степени селективности можно достичь также за счет увеличения напряжения возврата пускового органа устройства после

возникновения ОЗЗ устройства «Альтра», расположенного ближе к источнику питания.



а – токи нулевой последовательности присоединений, б – напряжение нулевой последовательности, в – фазные напряжения СШ

Рисунок 3. Осциллограммы возникновение ОЗЗ и его выключение
a – connected zero-sequence currents, b – zero-sequence voltage, c – phase voltages

Figure 3. Oscillograms for the occurrence of OZZ and its shutdown

После возникновения ОЗЗ в месте К1, рис. 1 запускаются устройства А1 и А3. Поскольку устройство А3 находится ближе к месту аварии, то оно действует на отключение линии Л21 со своей выдержкой времени. После этого напряжение нулевой последовательности в сети сразу не исчезает, оно уменьшается по аperiодическому закону. Поэтому устройство А1 на подстанции А сразу не возвращается в исходное состояние и может подействовать на отключение линии Л2, но это будет неселективное действие (повреждение уже ликвидировано устройством А3). Чтобы устройство А1 быстрее вернулось в исходное состояние после отключения

внешнего ОЗЗ, предусмотрена возможность динамического изменения коэффициента возврата пускового органа по напряжению нулевой последовательности. В конфигурации этого устройства записан вводимый в действие дополнительный коэффициент возврата после его срабатывания. После ввода дополнительного коэффициента возврата изменяется напряжение возврата по $3U_0$ – оно становится больше и устройство А1 быстрее вернется в исходное состояние после срабатывания и не произойдет неселективное срабатывание. После возврата устройства в исходное состояние автоматически устанавливается первый (основной) коэффициент возврата измерительного органа по напряжению $3U_0$.

В некоторых электрических сетях не всегда можно обеспечить селективность работы устройств «Альтра» выбором времени срабатывания и направлением. Рассмотрим одну из таких сетей с напряжением 20 кВ, которые в последнее время начали внедрять в электроэнергетические системы Российской Федерации (рис. 4). Распределительные пункты РП-1, РП-2, РП-3 соединены с подстанциями ПС-1 и ПС-2. В приведенной схеме РП-1 питается от подстанции ПС-1, РП-3 – от подстанции ПС-2, а РП-2 – транзитом от РП-3. Возможно питание распределительного пункта РП-2 от подстанции ПС-1 через РП-1 (выключен 2Q3, включен 2Q1). Также возможно питание распределительного пункта РП-1 транзитом от РП-2 (выключен 1Q1, включен 2Q1). Такая схема электрической сети позволяет повысить надежность электроснабжения потребителей. На распределительных пунктах РП-1, РП-2, РП-3 установлены защитные устройства А1, А2, А3, предназначенные для защиты присоединений РП от ОЗЗ. В такой сети нельзя обеспечить селективную работу устройств «Альтра» во время ОЗЗ на линиях, по которым осуществляется питание распределительных пунктов РП-1, РП-2, РП-3 выбором соответствующих времен.

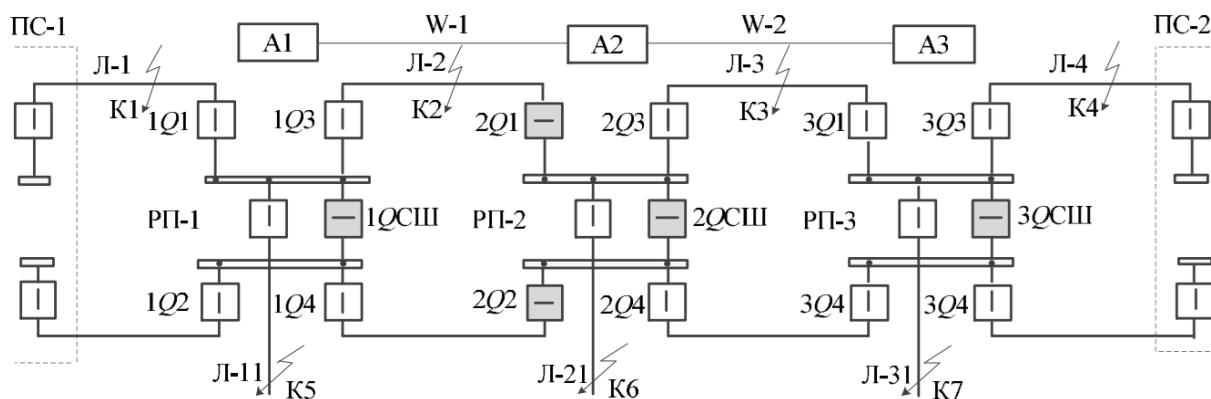


Рисунок 4. Схема нормальной эксплуатации электрической сети

Figure 4. Scheme of normal operation of the electrical network

Если обеспечивать селективность выбором соответствующих времен срабатывания устройств «Альтра», то необходимо выполнить взаимоисключающие условия:

- замыкание в месте K1 - питание всех РП осуществляется от подстанции PC-2 (выключен 1Q1, включены 1Q3, 2Q1, 2Q3, 3Q1, 3Q3) – должно быть выполнено условие

$$t_{A3} > t_{A2} > t_{A1},$$

где t_{A1} , t_{A2} , t_{A3} – время срабатывания соответственно устройств A1, A2, A3;

– замыкание в месте K4 – питание всех РП осуществляется от подстанции PC-1 (выключен 3Q3, включены 1Q1, 1Q3, 2Q1, 2Q3, 3Q1) – должно быть выполнено противоположное условие $t_{A3} < t_{A2} < t_{A1}$.

Селективную работу устройств защиты в таких сетях можно осуществить за счет блокировки их работы при возникновении ОЗЗ. Такую блокировку можно осуществить, используя выходные бинарные сигналы защитных устройств. Для передачи бинарных сигналов между Устройствами A1 и A2 необходимо установить линию связи (проводящую или беспроводную) W-1. Такую же линию связи (W-2) необходимо установить между устройствами A2 и A3.

Выводы или заключение.

1. В работе показано, что согласовать работу устройств защиты от ОЗЗ последовательных участков электрической сети только по току и напряжению нулевой последовательности нет возможности. Для обеспечения селективной работы устройств релейной защиты от ОЗЗ в такой сети их работу следует согласовывать по времени и направлению. В некоторых электрических сетях напряжением 20 кВ, которые в последнее время начали внедряться в электроэнергетических системах Российской Федерации, где предусмотрена возможность изменять направление питания отдельных распределительных пунктов (РП), не всегда можно обеспечить селективность работы устройств защиты от ОЗЗ только выбором времени срабатывания и направления. Селективную работу устройств защиты от ОЗЗ в таких сетях можно обеспечить за счет блокирования их работы. Такую блокировку можно осуществить, используя бинарные сигналы от устройств защиты смежных элементов.

2. Предложено, что для уменьшения величины ступени селективности времени срабатывания можно использовать динамическое изменение коэффициента возврата измерительного органа по напряжению нулевой последовательности.

3. Показано, что селективность устройств «Альтра» в ряде электрических сетей можно осуществить за счет блокировки их работы при возникновении ОЗЗ на кабелях питания. Учет изложенных рекомендаций по выбору параметров срабатывания цифровых защит в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью позволит существенно улучшить селективность их работы, особенно в электрических сетях сложной конфигурации.

Список литературы

1. Андреев А.А. Анализ существующих разновидностей защит от однофазных замыканий на землю и условия их применения // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки, 2021, т. 4, №72. С. 56-70.
2. Ataulayev N., Norqulov A., Muxammadov B., Majidov A., Togayev I. Principles of protection against single phase earth faults in networks with capacitive current compensation // E3S Web of Conferences, 2024, №548. P. 06008.
3. Toader D., Vintan M., Solea C., Vesa D., Greconici M. Analysis of the Possibilities of Selective Detection of a Single Line-to-Ground Fault in a Medium Voltage Network with Isolated Neutral // Energies 2021, 14. P. 7019. <https://doi.org/10.3390/en14217019>
4. Валова Т.О., Козлов А.Н. Феррорезонансные перенапряжения: условия возникновения и способы ограничения // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки, 2018, 81. С. 91-92.
5. Вааыех А.Г., Байати Н. Adaptive Overhead Transmission Lines Auto-Reclosing Based on Hilbert–Huang Transform // Energies 2020, 13. P. 5416. <https://doi.org/10.3390/en13205416>
6. Бык Ф.Л., Какоша Ю.В., Мышкина Л.С. Фактор надежности при проектировании распределительной сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2020, т. 22, №6. С. 43-54. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-6-43-54>
7. Burkhardt E., Hilbrich D., Offermann N., et al. The short-term isolated star point grounding to detect earth faults in compensated networks. The concept. 2020. 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Torino, Italy, 2020, P. 1–5.

8. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии. ПТЭЭП (с изменениями 2022 г.)
9. Baran P., Kidyba V., Pryshliak Y., Sabadash I. Automatic Reclosing for Isolated Neutral Electric Grid Under Single-phase to Ground Fault // SEPES 2020, 2(1). P. 1 – 7.
10. ПУЭ 7. Правила устройства электроустановок. Издание 7.
11. Высоких Д.Д. Инновации в области релейной защиты и автоматики // Universum: технические науки 2024, т. 6, №123. С. 39-45.
12. Yuan W., Li Y., Xu L., Li T., Chen X. A Fast faulty phase selection method considering fault tolerance for single phase to ground fault in distribution networks // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2023, Vol. 72. P. 1–12.
13. Qin J., Ning X., Fan S., Jia Z. Discharge ignition mechanism of tree-contacting single-phase-to-ground faults of overhead lines // Power Syst. Technol., 2023, Vol. 47. P. 1289–1298.
14. Xu L., Li Y., Yuan W., Li T., Chen X. An adaptive faulty phase detection method based on wavelet packet reconstruction energy of three-phase voltage signals in resonant grounded distribution systems // Electr. Power Syst. Res., 2023, Vol. 225. P. 109774.