

Небалансы

Алексей Шалин, д.т.н., профессор Новосибирского государственного технического университета . Андрей Хабаров, к.т.н., инженер-программист ЗАО «СИНЕТИК», г. Новосибирск

В [1] были перечислены разновидности направленных защит от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в сетях 6–35 кВ, а в [2] показано, как могут изменяться основные параметры рабочих сигналов, поступающих на защиту при перемежающихся дугах. Из описанного в [2] не следует делать вывод о принципиальной неработоспособности направленных защит в режимах с перемежающимися дугами. Если рабочие сигналы интегрировать в течение нескольких десятых долей секунды и «запоминать» факт запуска защиты на время возможной бестоковой паузы, то на основе рассматриваемого принципа вполне можно построить эффективные защиты от ОЗЗ.

Это подтверждает опыт эксплуатации нескольких сотен устройств направленной токовой защиты от ОЗЗ, разработанной одним из авторов настоящей статьи [3, 4, 5] и установленной в некоторых энергосистемах России. Как производственные испытания с имитацией перемежающейся дуги, так и опытная эксплуатация защит дали положительные результаты.

Международный опыт эксплуатации направленных защит линий от ОЗЗ также подтвердил их эффективность, но некоторые разновидности таких защит, по признанию самих разработчиков и изготовителей, а также по данным эксплуатации, ведут себя неудовлетворительно при ОЗЗ с перемежающимися дугами.

Простейшие разновидности направленных токовых защит от ОЗЗ эксплуатируются в России уже в течение десятков лет. Однако до сих пор отсутствуют методики расчета их уставок, что сильно усложняет труд проектантов и вызывает сомнение в возможности эффективной работы защит в первые годы после введения их в работу до тех пор, пока необходимые уставки не будут найдены опытным путем в процессе эксплуатации. Этот материал направлен на решение этого вопроса.

Ограничения по чувствительности и быстродействию защит

Многие разработчики направленных защит от ОЗЗ в своих рекламных материалах указывают в качестве возможных уставок самые малые токи и напряжения срабатывания, которые можно реализовать на их изделиях в лабораторных условиях. Речь иногда идет о первичном токе срабатывания порядка 0,2–0,3 А. В некоторых случаях рекомендуется использовать мгновенно действующие защиты, даже если в этом нет необходимости. Попытки воспользоваться такими рекомендациями на практике часто приводят к неселективным срабатываниям защит.

Для этого есть три основные причины.

В большинстве случаев в реальных сетях, даже при отсутствии ОЗЗ, по присоединениям постоянно или периодически протекают токи нулевой последовательности (небалансы), вызванные описанными ниже причинами.

Практические попытки многих специалистов измерить значения этих токов в процессе эксплуатации часто оканчиваются неудачей из-за неправильно выбранных приборов, замера небалансов не в тех режимах, когда они максимальны, и т.д.

Первый случай. Для замера токов небаланса используются чувствительные миллиамперметры, имеющие большое входное сопротивление (например, сотни Ом). В

результате включения такого прибора в цепь вторичной обмотки трансформатора тока нулевой последовательности (ТТНП) ток в его цепи становится близким к нулю, а после возвращения схемы в исходное состояние вновь возрастает до прежнего значения. Небаланс как бы прячется, а потом появляется вновь, готовый привести к неселективному действию защиты.

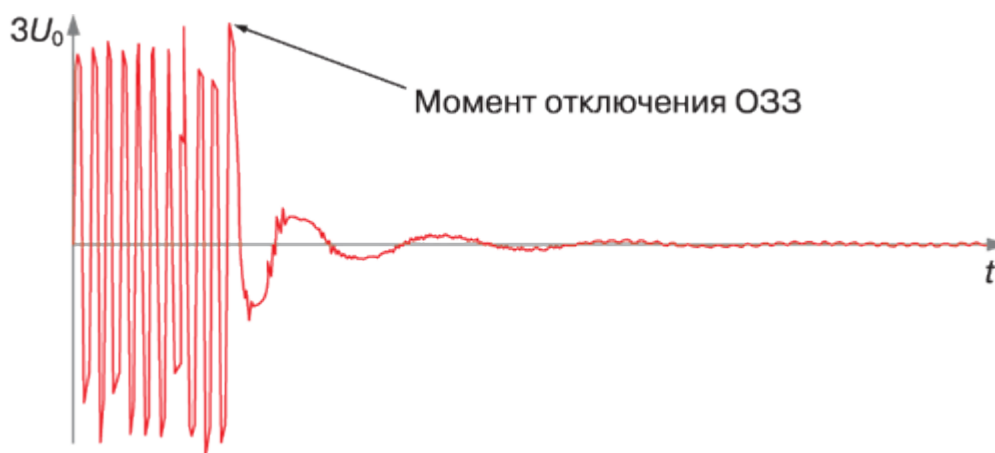
Второй случай из этой серии. Замеры небалансов выполнены корректно, полученные значения зафиксированы. Через несколько часов в «смежной» сети, электрически отделенной от рассматриваемой, возникает ОЗЗ и через межцепные емкости двухцепных линий (реже – через межобмоточные емкости питающих трансформаторов) напряжение нулевой последовательности поступает в рассматриваемую сеть, вызывая в ней повышенные токи небаланса. Это также может привести к неселективному срабатыванию защит.

Измерительные трансформаторы тока нулевой последовательности (в меньшей степени – трансформаторы напряжения) в области малых сигналов могут дать весьма большие погрешности.

В некоторых экспериментах при первичных токах отечественных ТТНП, составляющих доли ампера, были зафиксированы угловые погрешности в десятки электрических градусов и весьма значительные погрешности по модулю. В результате, например, вектор вторичного тока нулевой последовательности неповрежденной линии может попасть в область срабатывания и защита отключит эту линию. При возрастании токов погрешности сначала уменьшаются, а потом снова начинают расти.

Мгновенно действующие защиты в гораздо большей степени подвержены всевозможным «вредным воздействиям», чем защиты с выдержкой времени.

Рис. 1. Случай феррорезонанса после отключения ОЗЗ



Поэтому, если нет острой необходимости использовать защиты без выдержки времени, этого лучше избегать. Например, при перемежающихся дугах, описанных в [2], у защиты с выдержкой времени и интегрированием рабочего сигнала гораздо больше шансов остаться селективной, чем у аналогичной без выдержки времени.

На рис. 1 приведена полученная в процессе производственных испытаний осциллограмма напряжения нулевой последовательности на сборных шинах. Из нее видно, что после отключения замыкания на землю на шинах еще в течение нескольких десятых долей секунды присутствует напряжение нулевой последовательности, вызванное процессом феррорезонанса с участием измерительного трансформатора напряжения и емкостей оставшихся в работе линий. Вектор тока нулевой последовательности, протекающего при этом по оставшимся в работе (неповрежденным) линиям, может попасть в зону действия их защит, что приведет к их отключению. Частота токов и напряжений нулевой последовательности после отключения ОЗЗ резко снижается, но это не мешает

отключению одной или нескольких неповрежденных линий.

Причина заключается в том, что частотные фильтры, устанавливаемые в большинстве защит от ОЗЗ, являются фильтрами-пробками высоких частот и легко пропускают на реагирующие органы субгармонические составляющие. Предотвратить описанные ложные срабатывания можно, введя соответствующую выдержку времени и использовав заземляющий резистор.

Определение небалансов

Для расчета уставок направленных защит необходимо исследовать виды «небалансов», которые могут присутствовать в защите при отсутствии на защищаемом присоединении ОЗЗ и способны привести к срабатыванию чувствительных видов защит.

Под небалансом в защите от однофазных замыканий на землю будем понимать рабочий сигнал (в рассматриваемом случае – ток или напряжение нулевой последовательности), «ощущаемый» защитой при отсутствии ОЗЗ на защищаемом присоединении или искажающий её поведение при ОЗЗ на защищаемом присоединении. Одной из особенностей небалансов в защитах от ОЗЗ является то, что некоторые из них могут не только приводить к ложным или излишним срабатываниям защиты, но и способны влиять на её чувствительность при замыкании на защищаемом присоединении.

Следует отметить, что описанные ниже исследования не являются полностью завершёнными. Некоторые процессы и сигналы ещё предстоит исследовать.

Преждевременно было бы на основании описанных ниже материалов писать методики расчета уставок всех перечисленных в [1] разновидностей направленных токовых защит. Тем не менее описанные ниже результаты, на взгляд авторов, представляют интерес для специалистов и могут послужить объектом обсуждения.

По причинам, вызвавшим появление небалансов в защите, их можно условно поделить на следующие три основные группы:

- небалансы, связанные с различными процессами в сети, которые в свою очередь можно разделить на длительно присутствующие в сети и кратковременно появляющиеся и исчезающие;
- небалансы, вызванные погрешностями измерительной аппаратуры, значения которых в меньшей или большей степени зависят от режима сети;
- можно выделить отдельную группу экстремальных небалансов, значения которых иногда бывает сложно определить и от которых трудно или практически невозможно отстроиться по величине.

Некоторые разновидности небалансов могут существовать, не изменяясь, длительное время, другие появляются и исчезают, третьи меняют свою величину при изменении режима сети.

Небалансы, связанные с различными процессами в сети

Проведенный анализ позволил выявить следующие виды небалансов защиты от ОЗЗ, вызванные разного рода процессами в сети:

- небалансы, вызванные феррорезонансными явлениями;
- небалансы напряжений и токов нулевой последовательности, вызванные несимметрией фазных сопротивлений сети, имеющейся в нормальном режиме;
- небаланс, связанный с несимметрией фазных ЭДС источника питания;
- небаланс, вызванный влиянием сетей смежных напряжений;
- небалансы, вызванные влиянием параллельных линий;

- небаланс, вызванный несимметрией фазных нагрузок.

Своеобразным небалансом, вызванным внешними ОЗЗ, является емкостный ток защищаемого присоединения, который ощущает защита при ОЗЗ на соседних присоединениях. Однако от такого небаланса направленная защита отстроена «по углу», поэтому в приведенный выше перечень он не вошел.

Небалансы, вызванные погрешностями измерительной аппаратуры

- небаланс по напряжению нулевой последовательности $3U_0$, вызванный неидентичностью характеристик фазных обмоток трансформаторов напряжения;
- небаланс по току нулевой последовательности $3I_0$ трехтрансформаторного фильтра токов нулевой последовательности;
- небаланс по току $3I_0$ кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности;
- небаланс, вызванный угловыми погрешностями измерительных трансформаторов (в первую очередь для защит, реагирующих на активный ток);
- небалансы токов нулевой последовательности в защитах, установленных на пучках кабелей, вызванные нарушением контактных соединений.

Экстремальные небалансы

Экстремальные небалансы возникают, как правило, вследствие изменения режима сети. При этом одни из них могут быть связаны только с процессами в сети (например, небалансы, вызванные феррорезонансными явлениями), а другие вызваны погрешностями измерительной аппаратуры, значительно возрастающими с изменением режима сети (например, небаланс ФТНП при увеличении первичного тока; небаланс в защите, установленной на пучке кабелей, вызванный нарушением контактных соединений и возрастающий с увеличением тока нагрузки, например, в режиме самозапуска). К экстремальным небалансам можно отнести следующие.

Небалансы, вызванные феррорезонансными явлениями

Рис.1 иллюстрирует один из режимов, вызывающих значительные по величине сигналы в защите от ОЗЗ, связанный с феррорезонансными явлениями. Как отмечалось выше, для предотвращения ложных срабатываний защиты в этом режиме целесообразно использовать выдержку времени и устанавливать в сети заземляющие резисторы. Появление феррорезонанса с участием измерительного трансформатора напряжения при возникновении в сети ОЗЗ, вызывает напряжение на выводах «разомкнутого треугольника», которое может достигать 200–300 В [6]. В сети при этом протекают значительные по величине токи нулевой последовательности. Установка в сети заземляющего резистора необходимой величины исключает феррорезонанс, а вместе с ним и соответствующие небалансы.

Небалансы трехтрансформаторного ФТНП и кабельного ТТНП

От токов небаланса ФТНП и ТТНП нормального режима в большинстве случаев удается отстроиться увеличением тока срабатывания защиты. Однако в режиме самозапуска двигателей на приемной подстанции, и тем более в режиме междуфазного КЗ, ток небаланса может увеличиться настолько, что отстройка от него по величине приведет к недопустимому загроблению защиты, т.е. небаланс перейдет в разряд экстремальных. Значения соответствующих небалансов при использовании трехтрансформаторного

фильтра токов нулевой последовательности могут быть рассчитаны в соответствии с рекомендациями [7], а при использовании ТТНП – в соответствии с [8].

Небаланс, вызванный неравенством суммарных продольных фазных сопротивлений

При нарушении контактных соединений фаз кабелей в пучке, в защите от ОЗЗ может появиться ток небаланса, вызванный неидентичностью характеристик намагничивания кабельных ТТНП [9], значение которого может быть весьма значительным. Для предотвращения неправильных действий защиты в рассматриваемом случае необходимо предусматривать соответствующее устройство, способное выявлять факт неравномерного распределения тока по кабелям и оповещать об этом обслуживающий персонал. В процессе одного из натуральных экспериментов один из авторов настоящей статьи обнаружил ещё одну разновидность экстремального небаланса. Этот небаланс появился в цепи кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена после проведения опыта ОЗЗ на соседнем присоединении. Ток небаланса скачком увеличился во много раз в момент ОЗЗ, а потом в течение длительного времени (десятков минут) постепенно уменьшался. Подробные исследования проходящих при этом процессов выполнить не удалось. Изучение этого и других подобных видов небаланса – дело будущего.

Методика расчета небалансов

Небаланс по напряжению нулевой последовательности, вызванный неидентичностью характеристик фазных обмоток трансформаторов напряжения

Для измерения напряжения $3U_0$ в сетях 6–10 кВ, как правило, используются трехфазные пятистержневые трансформаторы напряжения с двумя вторичными обмотками, одна из которых соединена по схеме звезды, а вторая – по схеме разомкнутого треугольника, реализующая фильтр напряжения нулевой последовательности.

В некоторых случаях для измерения напряжения в качестве ФНП используется группа из трех однофазных ТН.

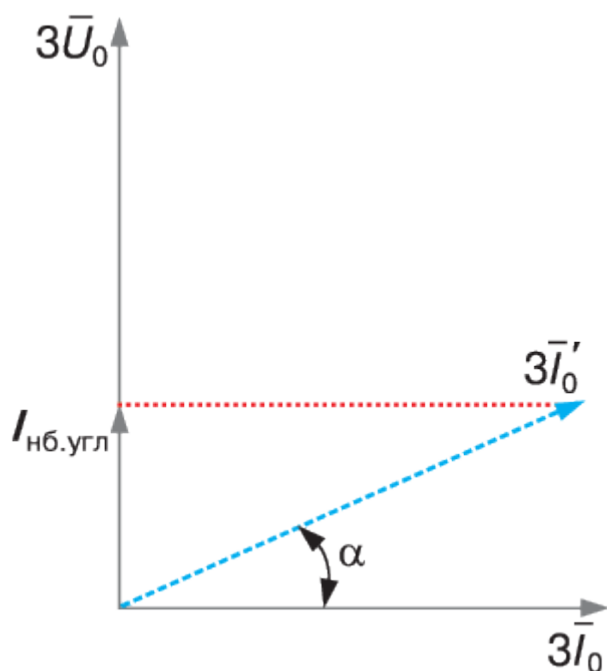


Рис. 2. Появление тока небаланса при наличии угловой погрешности

$3I_0$ – первичный емкостный ток в неповрежденной линии, отстающий от напряжения $3U_0$ на угол в 90 электрических градусов.

При несимметрии параметров фильтров напряжения нулевой последовательности (трансформаторов напряжения) или его нагрузок, на выводах обмоток, соединенных в

«разомкнутый треугольник», может появиться напряжение небаланса. Величину этого небаланса на разомкнутых зажимах нулевых обмоток, приведенную к первичной обмотке, можно оценить по заданной допустимой погрешности измерения фазных напряжений следующим образом [8]:

$$U_{\text{нб.ТН}} = \frac{U_{\Phi} f_U}{2} \quad (1)$$

где U_{Φ} – фазное напряжение сети;
 f_U – погрешность ТН.

Небаланс по току нулевой последовательности трехтрансформаторного фильтра токов нулевой последовательности

В сетях с воздушными ЛЭП напряжением 35 кВ обычно не удается установить кабельные трансформаторы тока нулевой последовательности и в защите от ОЗЗ приходится использовать трехтрансформаторный фильтр токов нулевой последовательности. В этом случае, как правило, возникает довольно большой небаланс, который должен быть учтен в расчетах. Значение этой составляющей небаланса может быть рассчитано, например, по методике, изложенной в [7].

Небаланс по току $3 I_0$ кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности В соответствии с [8] рассматриваемая составляющая тока небаланса изменяется примерно пропорционально токам нагрузки. Величину небаланса при произвольной нагрузке $I_{\text{нб.ТТНП}}$ приближенно можно определить следующим образом:

$$I_{\text{нб.ТТНП}} = I_{\text{нб.300}} \frac{I_{\text{нагр}}}{300} \quad (2)$$

где $I_{\text{нб.300}}$ – ток небаланса ТТНП при протекании по кабелю тока в 300 А (его значение может быть взято из [8]);

$I_{\text{нагр}}$ – реально протекающий ток в амперах.

Небаланс, вызванный угловыми погрешностями измерительных трансформаторов (в первую очередь для защит, реагирующих на активный ток)

Существует ещё одна составляющая токов небаланса, вызванная угловыми погрешностями измерительных трансформаторов и датчиков защиты. На рис. 2 приведена векторная диаграмма, иллюстрирующая рассматриваемый вопрос.

Предположим, что мы хотим построить направленную защиту от ОЗЗ, реагирующую на активный ток. В рассматриваемом случае рабочий сигнал в такой защите отсутствует, поскольку протекающий по защите ток – чисто емкостный. Однако если за счет угловых погрешностей измерительных трансформаторов тока, напряжения, а также соответствующих датчиков защиты вторичное значение тока нулевой последовательности $3\bar{I}'_0$ окажется повернутым относительно первоначального положения на угол α , как это показано на рис. 2, то появится соответствующий небаланс. При этом защита будет ощущать активный ток $\bar{I}_{\text{нб.угл}}$, равный проекции вектора тока на вектор напряжения $3\bar{U}_0$. При этом модуль тока небаланса $\bar{I}_{\text{нб.угл}}$ составит:

$$\bar{I}_{\text{нб.угл}} = 3 I_0 \sin \alpha \quad (3)$$

где a – суммарная угловая погрешность измерительных трансформаторов тока, напряжения и датчиков защиты.

Рассматриваемая составляющая тока небаланса появляется в защите в режиме внешнего ОЗЗ, и её необходимо учитывать при расчете тока срабатывания направленных токовых защит нулевой последовательности, реагирующих на активный ток.

В следующем номере журнала авторы рассмотрят другие случаи расчета небалансов и расскажут о составлении необходимых расчетных схем нулевой последовательности.

Литература

1. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Направленные защиты. Характеристики, особенности применения // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 6 (36).
2. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Направленные защиты. Влияние электрической дуги на направленные защиты // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 1 (37).
3. Патент 2071624 (Российская Федерация). Устройство для централизованной направленной защиты от замыканий на землю / Шалин А.И. – Оpubл. в Бюллетене № 1, 1997.
4. Патент 2157038 (Российская Федерация). Устройство для выявления присоединения с замыканием на землю в сети с изолированной нейтралью / Шалин А.И. – Оpubл. в Бюллетене № 27, 2000 г.
5. Шалин А.И., Щеглов А.И. Централизованная защита от замыканий на землю в сетях 35 кВ // Известия академии наук РФ. Энергетика. – 2002. – № 2. – С.104–116.
6. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей: Монография. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.
7. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 12. Токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110–500 кВ. Расчеты. – М.: Энергия, 1980. – 87 с.
8. Сирота И.М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. – Киев: Наукова Думка, 1983. – 267 с.
9. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Случаи неправильных действий защиты // Новости Электротехники. – 2005. – № 2 (32).

Алексей Шалин, д.т.н., профессор Новосибирского государственного технического университета

Андрей Хабаров, к.т.н., инженер-программист ЗАО «СИНЕТИК», г. Новосибирск

Источник: news.elteh.ru