

НЕБАЛАНСЫ В НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТАХ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Шалин А.И., Хабаров А.М.

(ООО «ПНП БОЛИД», Новосибирский государственный технический университет)

1. 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 идёт 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.

1. 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 отделённой от рассматриваемой, возникает ОЗЗ и через межцепные ёмкости двухцепных линий (реже - через межобмоточные ёмкости питающих трансформаторов) напряжение нулевой последовательности поступает в рассматриваемую сеть, вызывая в ней повышенные токи небаланса. Это также может привести к неселективному срабатыванию защит.

2. 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 неповреждённой линии может попасть в область срабатывания и защита отключит неповреждённую линию. При возрастании токов погрешности сначала уменьшаются, а потом снова начинают расти.

3. Мгновенно действующие защиты в гораздо большей степени подвержены всевозможным «вредным воздействиям», чем защиты с выдержкой времени, поэтому, если нет острой необходимости использовать защиты без выдержки времени, этого лучше избегать.

Например, при перемежающихся дугах, описанных в [1], 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 неё видно, что после отключения замыкания на землю на шинах ещё в течение нескольких десятых долей

секунды присутствует напряжение нулевой последовательности, вызванное процессом феррорезонанса с участием измерительного трансформатора напряжения и ёмкостей оставшихся в работе линий.

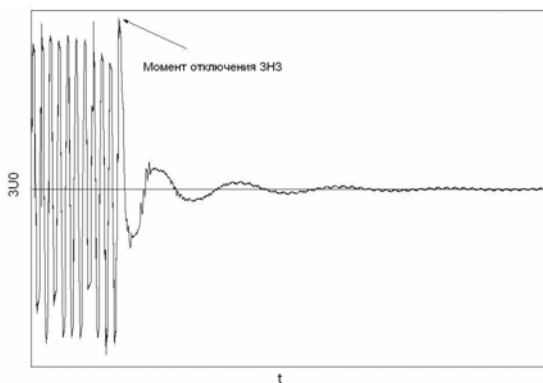


Рис.1. Случай феррорезонанса после отключения ОЗЗ

Вектор тока нулевой последовательности, протекающего при этом по оставшимся в работе (неповреждённым) линиям, может попасть в зону действия их защит, что приведёт к их отключению. Частота токов и напряжений нулевой последовательности после отключения ОЗЗ резко снижается, но это не мешает излишнему отключению одной или нескольких неповреждённых

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, используя заземляющий резистор.

2. Небалансы

Для расчёта 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. Тем не менее, описанные результаты, на взгляд авторов, представляют интерес для специалистов и могут послужить объектом обсуждения.

По причинам, вызвавшим появление небаланса 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

Проведённый 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 через силовые трансформаторы;
- небалансы, вызванные влиянием параллельных линий;
- небаланс, вызванный несимметрией фазных нагрузок.

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

Небалансы, вызванные погрешностями измерительной аппаратуры:

- небаланс по напряжению нулевой последовательности $3U_0$, вызванный неидентичностью характеристик фазных обмоток трансформаторов напряжения;
- небаланс по току нулевой последовательности $3I_0$ трёхтрансформаторного 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, и 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, небалансы, например, появляющиеся в сети 35 кВ при однофазном КЗ на землю со стороны высшего напряжения питающего трансформатора, описанные в [2] и т.д.), а другие вызваны погрешностями измерительной аппаратуры, значительно возрастающей 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 [3]. В сети при этом протекают значи-

тельные по величине токи нулевой последовательности. Установка в сети заземляющего резистора необходимой величины исключает феррорезонанс, а вместе с ним – и соответствующие небалансы.

Небалансы, например, появляющиеся в компенсированной сети 35 кВ при однофазном КЗ на землю со стороны высшего напряжения питающего трансформатора, описаны в [2].

Небалансы трёхтрансформаторного ФТНП и кабельного ТТНП

От токов небаланса ФТНП и ТТНП нормального режима в большинстве случаев удаётся отстроиться увеличением тока срабатывания защиты. Однако в режиме самозапуска двигателей на приёмной подстанции и, тем более, в режиме междуфазного КЗ ток небаланса может увеличиться настолько, что отстройка от него по величине приведёт к недопустимому заглублению защиты, т.е. небаланс перейдёт в разряд экстремальных. Значения соответствующих небалансов при использовании трёхтрансформаторного фильтра токов нулевой последовательности могут быть рассчитаны в соответствии с рекомендациями [4], а при использовании ТТНП – в соответствии с [5].

Небаланс, вызванный неравенством суммарных продольных фазных сопротивлений

При нарушении контактных соединений фаз кабелей в пучке в защите от ОЗЗ может появиться ток небаланса, вызванный неидеальностью кабельных ТТНП [6], 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. Подробных исследований проходящих при этом процессов выполнить не удалось. Изучение этого и некоторых других подобных видов небаланса – дело будущего.

3. Методика расчёта небалансов

Рассмотрим методику расчёта некоторых видов 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 трёхфазные пятистержневые трансформаторы напряжения с двумя вторичными обмотками, одна из которых соединена по схеме звезды, а вторая, реализующая фильтр напряжения нулевой последовательности, – по схеме разомкнутого треугольника. В некоторых случаях для измерения напряжения $3U_0$ в качестве ФННП используется группа из трёх однофазных ТН.

При несимметрии параметров фильтров напряжения нулевой последовательности (трансформаторов напряжения) или его нагрузок, на выводах обмоток, соединённых в «разомкнутый треугольник», может появиться напряжение небаланса. Величину этого небаланса на разомкнутых зажимах нулевых обмоток, приведённую к первичной обмотке, можно оценить по заданной допустимой погрешности измерения фазных напряжений следующим образом [5]:

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

где U_ϕ - фазное напряжение сети; f_U - погрешность ТН.

Небаланс по току нулевой последовательности $3I_0$ трёхтрансформаторного фильтра токов нулевой последовательности

В сетях с воздушными ЛЭП напряжением 35 кВ обычно не удаётся установить кабельные трансформаторы тока нулевой последовательности и в защите от ОЗЗ приходится использовать трёхтрансформаторный фильтр токов нулевой последовательности. В этом случае, как правило, возникает довольно большой небаланс, который должен быть учтён в расчётах. Значение этой составляющей небаланса может быть рассчитано, например, по методике, изложенной в [4].

Небаланс по току $3I_0$ кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности

В соответствии с [5] рассматриваемая составляющая тока небаланса изменяется примерно пропорционально токам нагрузки. Величину небаланса при произвольной нагрузке $I_{нб.ТТНП}$ приближенно можно определить следующим образом:

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

где $I_{нб.300}$ - ток небаланса ТТНП при протекании по кабелю тока в 300 А (его значение может быть взято из [5]); $I_{нагр}$ - 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.

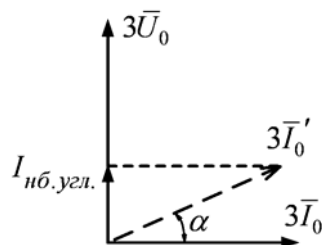


Рис.2. Появление тока небаланса при наличии угловой погрешности

На рис.2 $3\bar{I}_0$ - первичный ёмкостный ток в неповреждённой линии, отстающий от напряжения $3\bar{U}_0$ на угол в 90 электрических градусов.

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 ёмкостный. Однако если за счёт 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, то есть защита будет ощущать активный ток $\bar{I}_{нб.угл.}$, равный проекции вектора тока $3\bar{I}_0'$ на вектор напряжения $3\bar{U}_0$. При этом модуль тока небаланса $\bar{I}_{нб.угл.}$ составит:

$$I_{нб.угл.} = 3I_0 \sin \alpha, \quad (3)$$

где α - 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 расчёте тока срабатывания направленных токовых защит нулевой последовательности, реагирующих на активный ток.

Небалансы, вызванные влиянием параллельных линий

Эта составляющая небаланса может появиться в сети из-за смещения потенциала нейтрали, связанного с взаимовлиянием параллельных линий [7]. В сетях 35 кВ часто встречаются подстанции с двумя секциями сборных шин и отключенным в нормальном режиме секционным выключателем (рис.3).

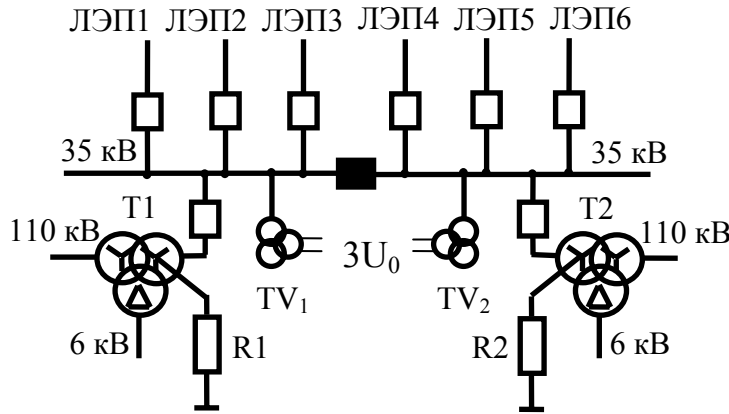


Рис.3. Схема питающей подстанции сети с резистивно-заземленной нейтралью

К каждой из секций таких подстанций бывает присоединено по несколько линий, большинство из которых – двухцепные (например, ЛЭП1 и ЛЭП4, ЛЭП2 и ЛЭП5, ЛЭП3 и ЛЭП6). На противоположной от подстанции стороне линии обычно работают отдельно, но

между ними существует связь через межцепные ёмкости. При ОЗЗ на одной из ЛЭП напряжение нулевой последовательности возникает на обеих секциях сборных шин, и токи нулевой последовательности протекают через линии, присоединённые как к первой секции сборных шин подстанции, так и ко второй. Если не учесть эту особенность при разработке и проектировании защиты, то возможны неселективные отключения неповреждённых линий при ОЗЗ в сети.

На рис.4 показана расчётная схема нулевой последовательности для рассматриваемой сети. Здесь E_ϕ - фазная ЭДС (напряжение нулевой последовательности в месте повреждения); R_{nep} - переходное сопротивление в месте ОЗЗ; C_{i0} - ёмкость трёх фаз i -ой ЛЭП относительно земли; $C_{ми}$ - суммарная межцепная ёмкость всех фаз соответствующей двухцепной ЛЭП; R_{N1} , R_{N2} - сопротивления заземляющих резисторов. На схеме рис.4 условно показаны комплекты защит нулевой последовательности, установленные на ЛЭП1, ЛЭП2 и ЛЭП4.

Для расчётной схемы по рис.4 легко получить схему замещения сети, изображённую на рис.5. Здесь $C_1 = \Sigma C_{i0}$ для 1 секции сборных шин; $C_2 = \Sigma C_{ми}$; $C_3 = \Sigma C_{i0}$ для 2 секции сборных шин. Для схемы рис.5 можно записать:

$$\bar{Z}_\Sigma = R_{nep} + \bar{Z}_1; \tag{4}$$

$$\bar{Z}_1 = \bar{A}/\bar{B}, \tag{5}$$

где

$$\bar{A} = R_{N1} [1 + jR_{N2}\omega(C_2 + C_3)];$$

$$\bar{B} = 1 + j\omega [R_{N1}(C_1 + C_2) + R_{N2}(C_2 + C_3)] - R_{N1}R_{N2}\omega^2 [C_2C_3 + C_1(C_2 + C_3)];$$

$$\bar{U}_{N2} = \bar{U}_{N1}(\bar{D}/\bar{F}), \tag{6}$$

причём

$$\bar{D} = j\omega C_2 R_{N2};$$

$$\bar{F} = 1 + j\omega R_{N2}(C_2 + C_3).$$

$$\bar{I}_3 = \bar{E}_\phi / \bar{Z}_\Sigma; \bar{U}_{N1} = \bar{E}_\phi / [(R_{nep} / \bar{Z}_1) + 1]; \tag{7}$$

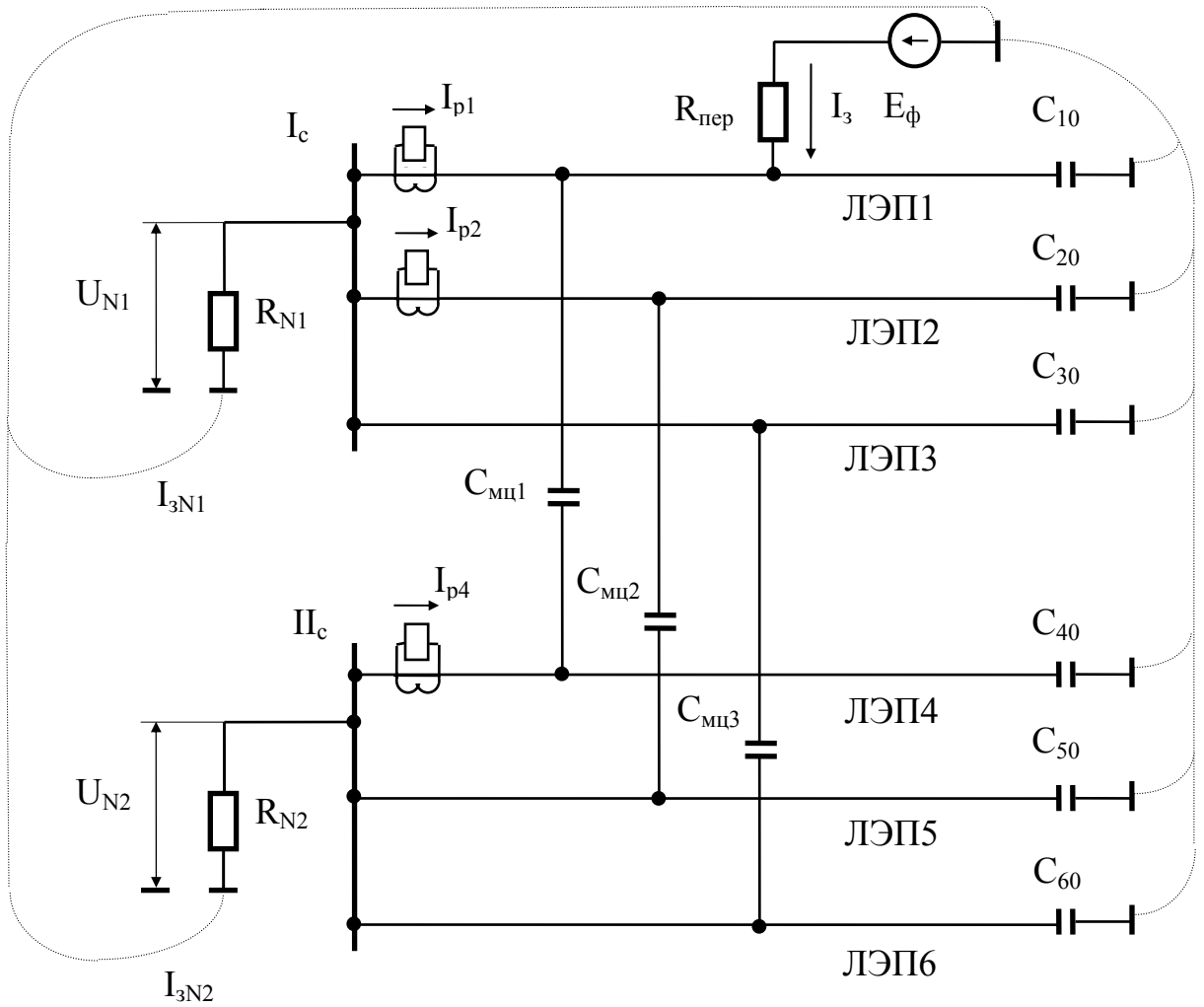


Рис.4. Расчётная схема сети

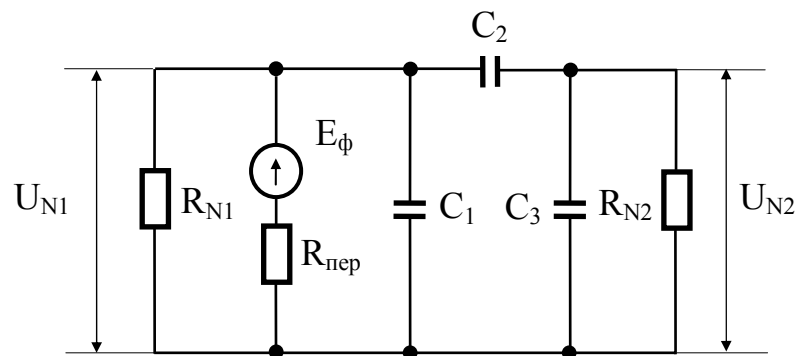


Рис.5. Схема замещения сети

Ток в аварийной ЛЭП (ЛЭП1) равен:

$$3\bar{I}_{0ав} = \bar{I}_3 - j\omega [\bar{U}_{N1}C_{10} + (\bar{U}_{N1} - \bar{U}_{N2})C_{мц1}]. \quad (8)$$

Ток в ЛЭП2 равен:

$$3\bar{I}_{0ЛЭП2} = j\omega [\bar{U}_{N1}C_{20} + (\bar{U}_{N1} - \bar{U}_{N2})C_{мц2}]. \quad (9)$$

Ток в ЛЭП4:

$$3\bar{I}_{0ЛЭП4} = j\omega [(\bar{U}_{N1} - \bar{U}_{N2})C_{мц1} - \bar{U}_{N2}C_{40}]. \quad (10)$$

Следует отметить, что в рассматриваемом случае, при одинаковых конструкциях всех трёх пар ЛЭП, угол между током каждой из ЛЭП4, ЛЭП5, ЛЭП6 и напряжением на нейтрали питающего трансформатора второй секции \bar{U}_{N2} - один и тот же (и равен углу тока через заземляющий резистор R_{N2} относительно напряжения \bar{U}_{N2}). Отсюда следует, что угол тока $3\bar{I}_0$ в каждой из этих ЛЭП относительно напряжения \bar{U}_{N2} равен нулю, т.е. токи $3\bar{I}_0$ относительно напряжения \bar{U}_{N2} - активные. Если ток в защите ЛЭП4 попадает в зону срабатывания (это вполне возможно при резистивном заземлении нейтрали и соответствующей фазовой характеристике защиты), то ЛЭП4 (а также ЛЭП5 и ЛЭП6) будут в рассматриваемом случае отключены неселективно. Чтобы этого не произошло, необходимо либо отстроить ток срабатывания защиты ЛЭП4 $I_{сз.лэп4}$ по величине от значения, рассчитанного по (10), либо выполнить эту отстройку аппаратным путём так, как это описано в [7]. То же самое надо сделать для защит остальных линий «неповреждённой» секции II. При расчёте тока $3\bar{I}_{0.лэп4}$ в соответствии с (4)...(10) в выражении (4) следует принять $R_{пер} = 0$, т.е. рассмотреть самый худший случай, как это и принято при расчёте уставок.

Если для части линий, присоединённых ко второй секции сборных шин, $C_{ми} = 0$, т.е. эти линии - одноцепные, а оставшаяся часть ЛЭП - двухцепные, как в рассмотренном примере, то ток в k-ой одноцепной ЛЭП будет равен:

$$3\bar{I}_{0k} = -j\omega\bar{U}_{N2}C_{k0}. \quad (11)$$

Этот ток имеет емкостной характер. Величина, подведённая к токовым входам направленного реле нулевой последовательности рассматриваемой одноцепной ЛЭП, на 90 электрических градусов отстаёт от подведённого к реле напряжения нулевой последовательности и выходит за пределы зоны срабатывания. Зато углы токов двухцепных ЛЭП, присоединённых к «здоровой» секции, сместятся относительно напряжения в сторону зоны срабатывания и для обеспечения селективного действия защиты от этих токов необходимо отстроиться.

Рассмотренный пример относился к наиболее распространённому случаю, когда обе цепи двухцепных ЛЭП принадлежали сетям с одинаковым напряжением. Однако иногда бывает иначе, например одна цепь принадлежит сети 35 кВ, а другая – 10 кВ. Такой случай описан в [8]. Тогда ОЗЗ в сети одного напряжения может вызвать смещение нейтрали в обеих сетях. При этом расчёт ведётся так же, как это описано выше.

Очевидно, что, например, влияние сети 35 кВ на сеть 10 кВ оказывается более заметным – при ОЗЗ в сети 35 кВ напряжение смещения нейтрали в сети 10 кВ больше, чем аналогичное смещение нейтрали сети 35 кВ при ОЗЗ в сети 10 кВ. Однако в принципе через параллельные ЛЭП обе сети влияют друг на друга.

Небаланс, вызванный влиянием сетей смежных напряжений через силовые трансформаторы

Эта составляющая небаланса возникает за счёт того, что, например, при КЗ на землю или ОЗЗ в сети смежного напряжения (например, со стороны обмотки высшего напряжения понижающего трансформатора, от обмотки низшего напряжения которого питается рассматриваемая сеть) напряжение нулевой последовательности через межобмоточную ёмкость этого трансформатора поступает в рассматриваемую сеть. Это может иметь место в том случае, если сеть низшего напряжения работает с изолированной нейтралью или подключена со стороны обмотки силового трансформатора, соединённой в треугольник (рис.6,а). Величину возникающего при этом напряжения нулевой последовательности можно определить по схеме замещения, приведённой на рис.6,б. Предполагаем, что в рассматриваемом случае в сети установлен дугогасящий реактор и заземляющий резистор.

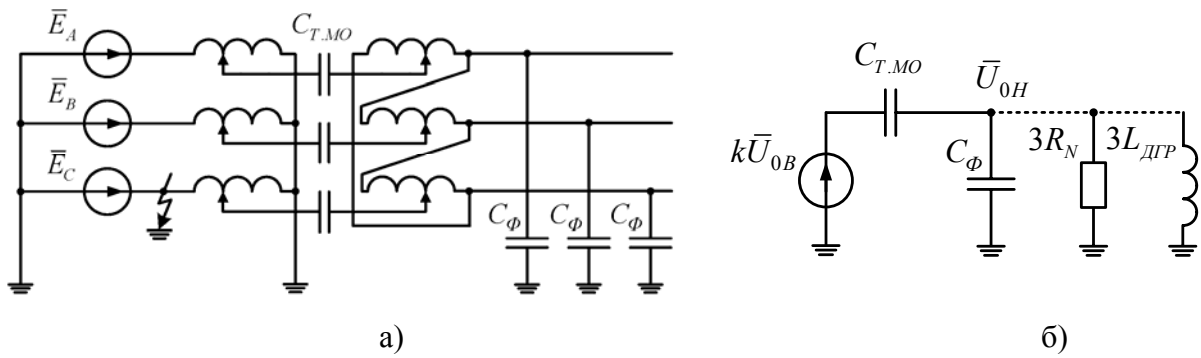


Рис.6. Возникновение напряжения нулевой последовательности в сети низшего напряжения при КЗ на землю (для сетей 110 кВ и выше) или ОЗЗ (для сетей 35 кВ) в сети высшего напряжения за счёт ёмкостной связи между обмотками силового трансформатора:

а – упрощенная схема сети; б – схема замещения нулевой последовательности

На рис.7 приведены расчётные зависимости для определения межобмоточной ёмкости двухобмоточных силовых трансформаторов, заимствованные из [9]. По горизонтальной оси откладывается мощность двухобмоточного силового трансформатора S_T , выбирается кривая, соответствующая высшему напряжению, и по вертикальной оси определяется искомое значение фазной ёмкости $C_{T(MO)}$.

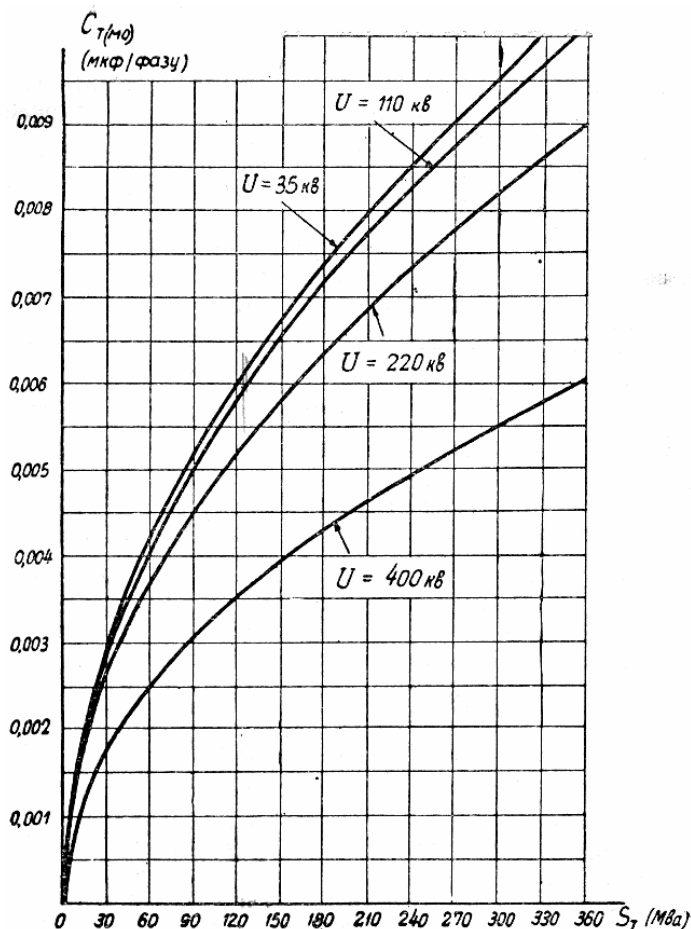


Рис.7. Расчётные зависимости для определения межобмоточной ёмкости силовых трансформаторов

Если нейтраль сети низшего напряжения заземлена через высокоомный резистор и дугогасящий реактор (как на рис. 6,б), то после несложных расчётов можно получить выражение (12) для определения значения напряжения смещения нейтрали сети низшего напряжения \bar{U}_{0H} . Если какой-то из элементов (дугогасящий реактор или заземляющий резистор) в сети отсутствует, то его исключают из рис.6,б и соответствующие параметры в выражении (12) приравнивают бесконечности.

$$U_{0H} = \frac{kU_{0B}}{\sqrt{\left(1 + \frac{C_{\Phi}}{C_{T.MO}} - \frac{1}{3\omega^2 LC_{T.MO}}\right)^2 + \left(\frac{1}{3R_N \omega C_{T.MO}}\right)^2}}, \quad (12)$$

где U_{0B} - напряжение нулевой последовательности со стороны высшего напряжения при КЗ на землю (для сетей 110 кВ и выше) или ОЗЗ (для сетей 35 кВ); k - коэффициент, учитывающий распределение напряжения U_{0B} по обмотке высшего напряжения трансформатора (приближённо $k = 1$ при изолированной нейтрали со стороны высшего напряжения силового трансформатора, $k = 0,5$ при эффективно заземленной нейтрали [9], при заземлении нейтрали через дугающий реактор и (или) высокоомный резистор необходимо принимать $0,5 \leq k \leq 1$ в зависимости от суммарного значения сопротивления в цепи нейтрали [10]); C_ϕ - суммарная ёмкость нулевой последовательности в сети низшего напряжения (для одной фазы); $C_{T.MO}$ - ёмкость между обмотками высшего и низшего напряжения силового трансформатора (для одной фазы); R_N - сопротивление заземляющего резистора в нейтрали сети низшего напряжения; L - индуктивность ДГР.

Обычно суммарная ёмкость нулевой последовательности в сети низшего напряжения C_ϕ во много раз больше межобмоточной ёмкости $C_{T.MO}$ силового трансформатора и напряжение U_{0H} не превышает нескольких процентов от фазного напряжения. Ситуация усложняется при появлении в сети низшего напряжения дугогасящих реакторов. При этом суммарное сопротивление фаз сети низшего напряжения относительно земли возрастает и напряжение на нейтрали может существенно увеличиться.

При действии защиты от ОЗЗ в сети низшего напряжения с выдержкой времени и согласовании её с временем срабатывания резервных защит от КЗ на землю линий со стороны высшего напряжения, рассматриваемую составляющую небаланса можно не учитывать при расчёте уставок защиты от ОЗЗ. Если же защита от ОЗЗ в сети низшего напряжения не имеет выдержки времени, то при наличии в этой сети дугогасящего реактора отстройка от рассматриваемой составляющей небаланса может представить серьёзные трудности.

Не только сеть «высшего» напряжения может влиять на смещение нейтрали в сети низшего напряжения, но и наоборот – ОЗЗ в сети низшего напряжения (например, 10 кВ) может привести к смещению нейтрали сети более высокого напряжения (например, 35 кВ). В принципе расчёт в этом случае ведётся так же, как это описано выше.

Ещё один случай появления напряжения нулевой последовательности возможен при заземлении питающего силового трансформатора с двух сторон. Практически это может иметь место, например, при питании сети 35 кВ, работающей с высокоомным заземлением нейтрали, от сети 110-220 кВ, нейтраль которой эффективно заземлена. В этом случае главной причиной возникновения напряжения нулевой последовательности в сети среднего напряжения при КЗ на землю в сети высшего напряжения является трансформация напряжений и токов нулевой последовательности (рис.8) [2, 10].

Величину напряжения \bar{U}_{0C} смещения нейтрали сети среднего напряжения в этом случае можно определить из схемы замещения нулевой последовательности, приведённой на рис.8,б. В схеме замещения предполагается, что все сопротивления и токи приведены к одному напряжению.

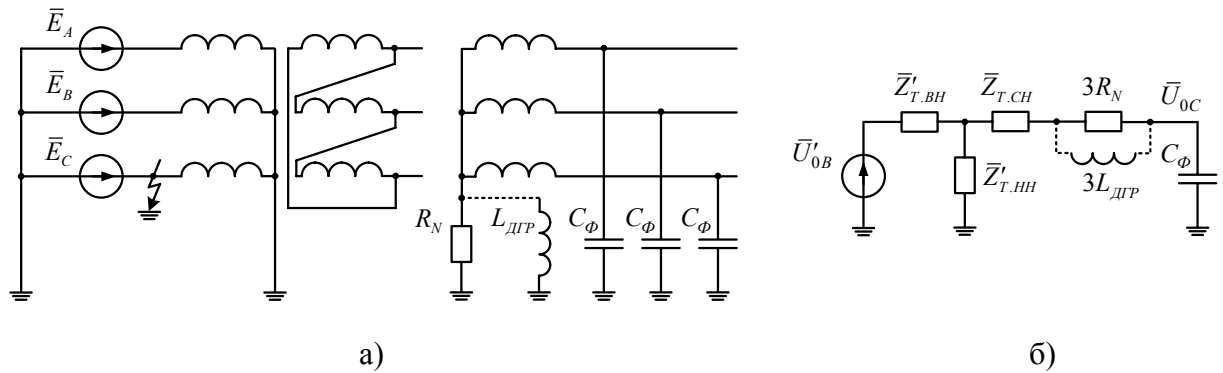


Рис.8. Возникновение напряжения нулевой последовательности в сети среднего напряжения при КЗ на землю в сети высшего напряжения при двухстороннем заземлении нейтралей силового трансформатора:

а – упрощенная схема сети; б – схема замещения нулевой последовательности

Выражение для определения напряжения нулевой последовательности со стороны системы среднего напряжения [10] выглядит следующим образом:

$$U_{0C} \approx \frac{U'_{0B} |Z'_{T.HH}|}{|Z'_{T.HH} + Z'_{T.BH}|}, \quad (13)$$

где $Z'_{T.HH}$, $Z'_{T.BH}$ - сопротивления обмоток трансформатора соответственно со стороны низшего и высшего напряжений, приведенные к одному напряжению.

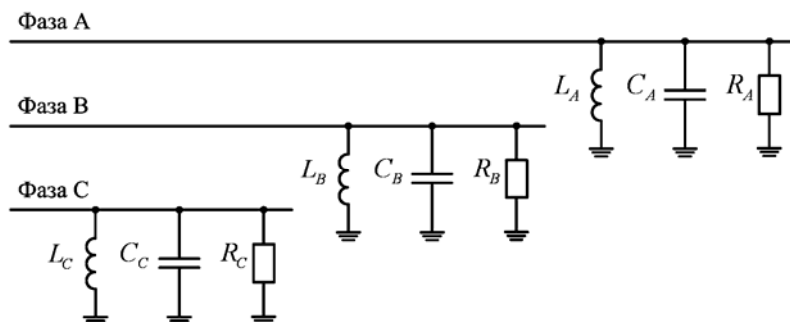
Следует отметить, что в рассматриваемом случае в схеме замещения рис.8,б индуктивность дугогасящей катушки и ёмкость сети включены последовательно. При отсутствии заземляющего резистора и настройке ДГР в режим полной компенсации в сети среднего напряжения может возникнуть резонанс напряжений, в результате чего напряжение в сети СН может недопустимо повыситься (см.[2]). Заземляющий резистор «срывает» резонанс и снижает напряжение в сети СН.

При действии защиты с выдержкой времени и согласовании её с временем срабатывания резервных защит от КЗ на землю линий со стороны высшего напряжения, рассматриваемую составляющую небаланса можно не учитывать при расчёте уставок защиты. В этом случае необходимо учитывать лишь длительно существующие ОЗЗ со стороны смежной сети с малыми токами замыкания на землю, так как КЗ на землю в сети с эффективно заземлённой нейтралью отключаются защитой от данного вида повреждений быстрее, чем успеет сработать защита от ОЗЗ.

Небалансы напряжений и токов нулевой последовательности, вызванные несимметрией фазных сопротивлений сети, имеющейся в нормальном режиме

В любой системе имеются включённые между каждым из фазных проводов и землёй индуктивность L_i , ёмкость C_i и активное сопротивление утечки по изоляции R_i (рис.9).

Индуктивности можно считать сосредоточенными в трансформаторах напряжения, нейтралеобразующих трансформаторах и так далее. Ёмкости и активные сопротивления утечки по изоляции имеются практически во всех силовых элементах схемы, но наибольшие ёмкостные токи сосредоточены в линиях (кабельных и воздушных) и двигателях.



точены в линиях (кабельных и воздушных) и двигателях.

Рис.9. Элементы расчётной схемы сети

Не во всех режимах работы сети соответствующие параметры схемы рис.9 одинаковы во всех фазах. Причинами появления несимметрии и соответствующих небалансов по току и напряжению $I_{неб.нес}$ и $U_{неб.нес}$ могут быть следующие:

- сгорание предохранителя в одной фазе трансформатора напряжения приводит к исчезновению из расчётной схемы индуктивности его фазы; недовключение фазы выключателя в цепи нейтралеобразующего трансформатора или нейтраллера также приводит к исключению из расчётной схемы её индуктивности;

- к нарушению симметрии фазных ёмкостей приводят: нарушение цикла транспозиции фазных проводов воздушной ЛЭП, обрыв шлейфа на воздушной ЛЭП, не приводящий к соприкосновению провода с заземлённой конструкцией, обрыв фазного изолированного провода, которым в последнее время монтируются некоторые воздушные ЛЭП, недовключение контактов в одной фазе выключателя, увлажнение слоистой фазной изоляции кабелей и других элементов силовой схемы, несимметричное подключение конденсаторов отбора мощности ВЧ-каналов и так далее;

- к нарушению симметрии активных сопротивлений фазных утечек по изоляции R_i приводят, например, прикосновения веток деревьев к фазным проводам, увлажнение изоляции кабелей, неравномерное загрязнение изоляторов на воздушных ЛЭП и так далее.

Составление расчётных схем нулевой последовательности для определения токов и напряжений небаланса

Рассмотрим случай, когда в рассматриваемом элементе, например линии, можно пренебречь величинами L_i и R_i . На рис.10 показана простейшая трёхфазная расчётная схема для резистивно-заземлённой сети с одним источником питания и одной линией. Если пренебречь падением напряжения в контуре заземления, то на рис.10 можно замкнуть цепь заземления (см. пунктир).

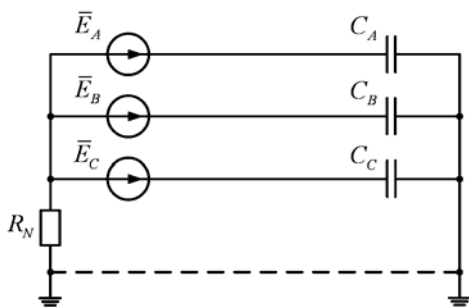


Рис.10. Расчётная трёхфазная схема сети

Напряжение нулевой последовательности \bar{U}_0 (напряжение на резисторе R_N) определяется через параметры остальных элементов схемы в соответствии со следующим выражением:

$$\bar{U}_0 = \frac{\bar{E}_A \bar{Y}_A + \bar{E}_B \bar{Y}_B + \bar{E}_C \bar{Y}_C}{\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C + \bar{Y}_N},$$

(14)

где $\bar{Y}_i = j\omega C_i$ - проводимости фаз сети (для ёмкостей); $\bar{Y}_N = 1/R_N$ - проводимость нейтрали (при наличии заземляющего резистора).

Подставив соответствующие величины проводимостей в (14), после несложных преобразований получим:

$$\bar{U}_0 = \frac{\bar{E}_A \omega R_N \left[\frac{\sqrt{3}}{2} (C_B - C_C) + j(C_A - 0,5(C_B + C_C)) \right]}{1 + j\omega R_N (C_A + C_B + C_C)}. \quad (15)$$

Получим выражение для определения напряжения нулевой последовательности для частного случая, когда ёмкость одной из фаз, например фазы А (рис.10), изменилась в k

раз (увеличилась или уменьшилась), то есть $C_B = C_C = C_\phi$, а $C_A = kC_\phi$. Подставив значения этих ёмкостей в (15), после простых преобразований получим:

$$\bar{U}_0 = \frac{j\bar{E}_A \omega R_N C_\phi (k-1)}{1 + j\omega R_N C_\phi (k+2)}. \quad (16)$$

Рассмотрим вначале случай увеличения ёмкости фазы А, то есть $k > 1$. В соответствии с методом симметричных составляющих схему, изображённую на рис.10, можно представить как наложение симметричной схемы, для которой все три фазные ёмкости равны друг другу и по величине составляют C_ϕ и ещё одной ёмкости $\Delta C_1 = C_\phi(k-1)$, включённой между фазным проводом фазы А и землёй. Источником напряжения нулевой последовательности как раз и является последняя ёмкость ΔC_1 . Тогда можем построить расчётную схему замещения нулевой последовательности, изображённую на рис.11. Здесь возникшая несимметрия представлена ЭДС фазы А (той, в которой возникла несимметрия), последовательно с которой включена ёмкость $\Delta C_1 = C_\phi(k-1)$ на которую изменилась ёмкость фазы А. Сама линия представлена ёмкостью $3C_\phi$, то есть утроенной величиной минимальной фазной ёмкости.

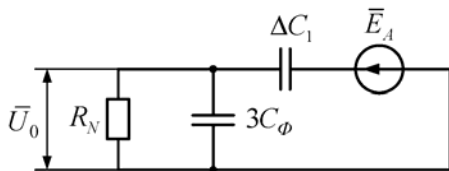


Рис.11. Расчётная схема нулевой последовательности

Для этой схемы легко получить расчётное выражение (16), что подтверждает правильность предложенного способа составления расчётной схемы нулевой последовательности.

Рассмотрим теперь случай уменьшения ёмкости фазы А, что соответствует $0 \leq k < 1$. При этом $C_B = C_C = C_\phi$, $C_A = kC_\phi$.

На рис.12 показана расчётная схема нулевой последовательности, которая была получена для рассматриваемого случая. Здесь ЭДС фазы А уменьшена вдвое и направлена в противоположную сторону по сравнению с предыдущей схемой, а последовательно с ней включена удвоенная ёмкость $\Delta C_2 = C_\phi(1-k)$, на которую уменьшилась по сравнению с симметричным режимом ёмкость фазы А. Ёмкость линии представлена утроенной ёмкостью фазы А $3kC_\phi$, то есть минимальной из трёх фазных ёмкостей.

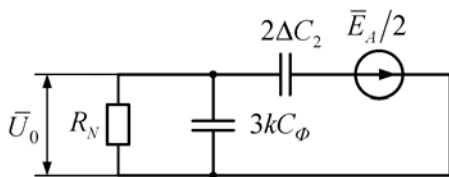


Рис.12. Расчётная схема нулевой последовательности

Для этой схемы также легко получить расчётное выражение (16), что свидетельствует о правильности способа составления расчётной схемы нулевой последовательности.

Рассмотрим способ построения расчётной схемы нулевой последовательности для общего случая, когда ёмкости в каждой из фаз по рис.10 различны и равны соответственно C_A , C_B и C_C , причём $C_A < C_B < C_C$. В этом случае в качестве симметричной схемы принимаем такую, в которой все ёмкости в фазах равны минимальной из реальных величин, то есть C_A .

Расчётная схема нулевой последовательности для рассматриваемого случая приведена на рис.13. Здесь $\Delta C_B = C_B - C_A$, $\Delta C_C = C_C - C_A$.

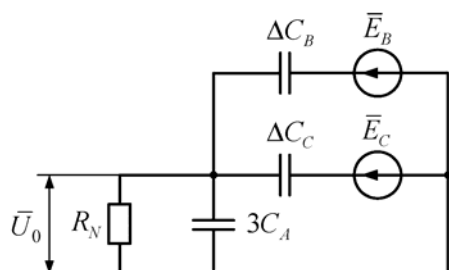


Рис.13. Расчётная схема нулевой последовательности для общего случая

Эту схему несложно привести к виду рис.14, при этом результирующая эквивалентная ЭДС $\bar{E}_{\text{ЭКВ}}$ определится следующим образом:

$$\bar{E}_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{C_{\text{ЭКВ}}} (\Delta C_B \bar{E}_B + \Delta C_C \bar{E}_C),$$

где $C_{\text{ЭКВ}} = \Delta C_B + \Delta C_C$.

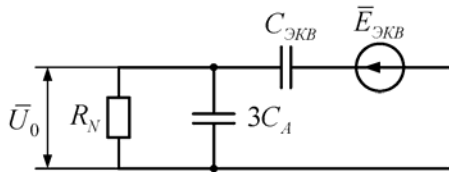


Рис.14. Упрощенная расчётная схема

Рассмотрим теперь способ построения расчётной схемы нулевой последовательности для общего случая неравенства активных сопротивлений утечек между фазами и землёй, когда активные сопротивления в каждой из фаз по рис.9 различны и равны соответственно R_A , R_B и R_C , причём $R_A > R_B > R_C$. В этом случае в качестве симметричной схемы принимаем такую, в которой все активные сопротивления в фазах равны максимальной из реальных величин, то есть R_A . Учтём также суммарную ёмкость трёх фаз сети относительно земли $3C_\phi$, пренебрегать которой в проводимых расчётах нельзя.

Расчётная схема нулевой последовательности для рассматриваемого случая приведена на рис.15. Здесь $\Delta R_B = \frac{R_A \cdot R_B}{R_A - R_B}$, $\Delta R_C = \frac{R_A \cdot R_C}{R_A - R_C}$.

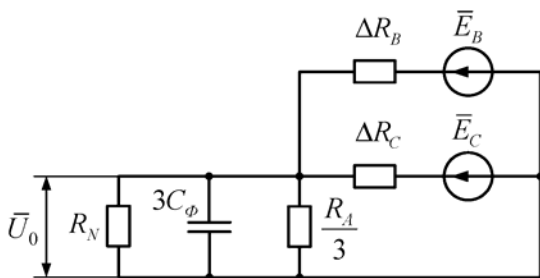


Рис.15. Расчётная схема нулевой последовательности для общего случая

Эту схему несложно привести к виду рис.16. При этом результирующая эквивалентная ЭДС $\bar{E}_{\text{ЭКВ}}$ определится следующим образом:

$$\bar{E}_{\text{ЭКВ}} = R_{\text{ЭКВ}} \left(\frac{\bar{E}_B}{\Delta R_B} + \frac{\bar{E}_C}{\Delta R_C} \right),$$

где $R_{\text{ЭКВ}} = \frac{\Delta R_B \cdot \Delta R_C}{\Delta R_B + \Delta R_C}$.

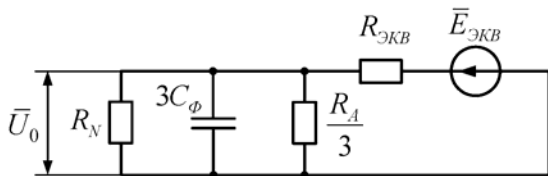


Рис.16. Упрощенная расчётная схема

Рассмотрим способ построения расчётной схемы нулевой последовательности для общего случая неравенства индуктивностей между фазами и землёй, когда индуктивности в каждой из фаз по рис.9 различны и равны соответственно L_A , L_B и L_C , причём $L_A > L_B > L_C$. В этом случае в качестве симметричной схемы принимаем такую, в которой все индуктивности в фазах равны максимальной из реальных величин, то есть L_A .

Расчётная схема нулевой последовательности для рассматриваемого случая приведена на рис.17. Здесь $\Delta L_B = \frac{L_A \cdot L_B}{L_A - L_B}$, $\Delta L_C = \frac{L_A \cdot L_C}{L_A - L_C}$.

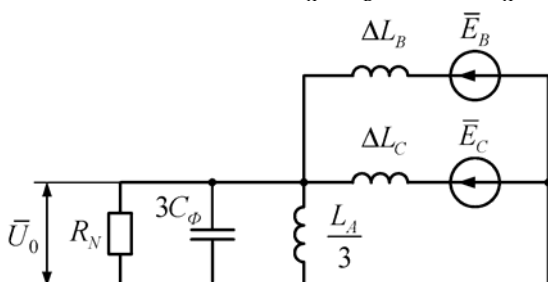


Рис.17. Расчётная схема нулевой последовательности для общего случая

Эту схему несложно привести к виду рис.18. При этом результирующая эквивалентная ЭДС $\bar{E}_{\text{ЭКВ}}$ определится следующим образом:

$$\bar{E}_{\text{ЭКВ}} = L_{\text{ЭКВ}} \left(\frac{\bar{E}_B}{\Delta L_B} + \frac{\bar{E}_C}{\Delta L_C} \right),$$

где $L_{\text{ЭКВ}} = \frac{\Delta L_B \cdot \Delta L_C}{\Delta L_B + \Delta L_C}$.

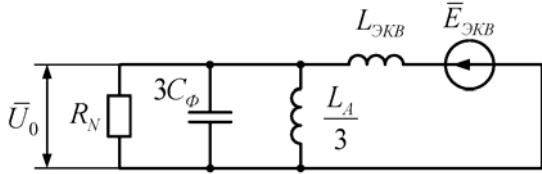


Рис.18. Упрощенная расчётная схема

В схеме реальной сети может присутствовать сразу несколько несимметрий. Для расчёта напряжений и токов небаланса в защите от ОЗЗ, появляющихся в рассматриваемом случае, следует составить *полную* расчётную схему замещения нулевой последовательности с учётом приведённых выше рекомендаций.

На рис. 19 приводится пример составления расчётной схемы замещения нулевой последовательности для сети, питающейся от одной секции подстанции, при появлении несимметрии в двух линиях. Здесь в качестве примера рассматривается случай, когда ёмкость в фазе А линии Л-1 увеличилась на ΔC , а в той же фазе линии Л-2 – уменьшилась на ту же величину. При этом величины эквивалентных ЭДС линий Л-1 и Л-2 в расчётной схеме по рис.19 составят соответственно \bar{E}_A и $-\bar{E}_A/2$, а величины эквивалентных ёмкостей – ΔC и $2\Delta C$. Легко убедиться, что в рассматриваемом случае $\bar{U}_0 = 0$, поскольку сеть в целом осталась симметричной. Но ток нулевой последовательности по линиям Л-1 и Л-2 протекает и равен: $\bar{I}_{0Л1} = -\bar{I}_{0Л2} = \bar{E}_A \cdot j\omega\Delta C$.

Хотя этот ток и не может привести к срабатыванию направленной защиты, поскольку $\bar{U}_0 = 0$, но отличить его при замерах вторичного тока небаланса от тока небаланса фильтра токов нулевой последовательности сложно. В случае если несимметрия возникает в разных фазах или изменения ёмкостей неодинаковы по величине, напряжение нулевой последовательности отлично от нуля и, в принципе, это может привести к срабатыванию защиты от ОЗЗ.

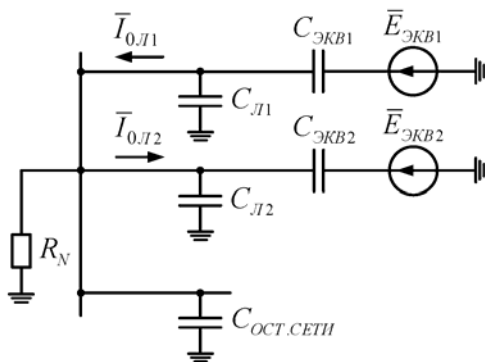


Рис.19. Расчётная схема сети при наличии несимметрий в двух линиях

Приведённый выше пример объясняет тот факт, что иногда при повторных замерах небаланса на выходе фильтра токов нулевой последовательности, проведённых через незначительный промежуток времени, величина замеренного тока может существенно отличаться. Видимо, в сети появилась новая несимметрия.

В схеме реальной сети может присутствовать сразу несколько несимметрий. Для расчёта напряжений и токов небаланса в защите от ОЗЗ, появляющихся в рассматриваемом случае, следует составить *полную* расчётную схему замещения нулевой последовательности с учётом приведённых выше рекомендаций.

Небаланс, связанный с несимметрией фазных ЭДС источника питания

Из-за несимметрии фазных напряжений на шинах питающей подстанции на изолированной (резистивно-заземлённой, компенсированной) нейтрали сети может появиться напряжение несимметрии [11]. Рассматриваемая ситуация относится, например, к случаю, когда секция сборных шин питается непосредственно от генератора (а остальные присоединения сборных шин имеют симметричные относительно земли сопротивления). Возмо-

жен и другой вариант: секция шин питается от трансформатора (остальные присоединения также симметричны и не могут привести к «смещению» нейтрали).

Получим в общем виде выражение для определения напряжения смещения нейтрали в резистивно-заземлённой сети при несимметричной системе ЭДС. При этом будем считать, что параметры сети симметричны и фазные ёмкости равны $C_A = C_B = C_C = C_\phi$. В качестве основной примем ЭДС фазы А \bar{E}_A . После соответствующих преобразований (14) получим:

$$\bar{U}_0 = \frac{j\omega C_\phi \bar{E}_A \left(1 + k_B e^{-j(2\pi/3 + \psi_B)} + k_C e^{j(2\pi/3 + \psi_C)}\right)}{j\omega 3C_\phi + \frac{1}{R_N}}, \quad (17)$$

где $k_B = E_B/E_A$, $k_C = E_C/E_A$ - коэффициенты, учитывающие неравенство фазных ЭДС по модулю; ψ_B , ψ_C - фазы, учитывающие возможные отклонения ЭДС по углу.

Определим теперь величину токов нулевой последовательности, протекающих в «симметричных» линиях (с одинаковыми сопротивлениями по фазам) при несимметричных фазных напряжениях на шинах питающей подстанции.

Рассмотрим для примера схему сети с одной ЛЭП на рис.10. Ток нулевой последовательности в этой линии, возникающий за счёт напряжения \bar{U}_0 в нейтрали, определится как сумма токов трёх фаз:

$$3\bar{I}_0 = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = (\bar{E}_A - \bar{U}_0)\bar{Y}_A + (\bar{E}_B - \bar{U}_0)\bar{Y}_B + (\bar{E}_C - \bar{U}_0)\bar{Y}_C.$$

После несложных преобразований получим:

$$3\bar{I}_0 = \bar{Y}_\phi (\bar{E}_{\Delta,HEC} - 3\bar{U}_0), \quad (18)$$

где $\bar{Y}_\phi = j\omega C_\phi$ - фазная ёмкостная проводимость; $\bar{E}_{\Delta,HEC} = \bar{E}_A + \bar{E}_B + \bar{E}_C$ - эквивалентная ЭДС при наличии несимметрии.

Выражение для определения напряжения нулевой последовательности \bar{U}_0 , вызванного несимметрией ЭДС, можно записать в следующем виде:

$$\bar{U}_0 = \frac{(\bar{E}_A + \bar{E}_B + \bar{E}_C)\bar{Y}_\phi}{3\bar{Y}_\phi + \frac{1}{R_N}} = \frac{\bar{E}_{\Delta,HEC}\bar{Y}_\phi R_N}{1 + 3\bar{Y}_\phi R_N}. \quad (19)$$

Подставив выражение (19) в (18) после несложных преобразований получим:

$$3\bar{I}_0 = \frac{\bar{E}_{\Delta,HEC}\bar{Y}_\phi}{1 + 3\bar{Y}_\phi R_N}. \quad (20)$$

Из полученных выражений (19) и (20) видно, что в рассматриваемом случае при наличии несимметрии в фазных напряжениях, в линии будет протекать активный ток, величина которого равна отношению напряжения \bar{U}_0 в нейтрали, вызванного этой несимметрией, к сопротивлению заземляющего резистора R_N . С учётом того, что активный ток резистора совпадает по фазе с приложенным к нему напряжением \bar{U}_0 , направление активного тока в линии противоположно этому напряжению (этот ток протекает по направлению к шинам).

При наличии нескольких ЛЭП, питающихся от одной секции шин, активный ток резистора будет распределяться по линиям пропорционально величинам их ёмкостей, то есть величина тока в каждой из ЛЭП составит:

$$3I_{0i} = \frac{U_0}{R_N} \frac{C_{\phi i}}{C_{\phi \Sigma}}, \quad (21)$$

где $C_{\phi i}$ - фазная ёмкость i -ой линии; $C_{\phi \Sigma}$ - суммарная фазная ёмкость сети.

Таким образом, ток небаланса, вызванный несимметрией в фазных напряжениях на шинах питающей подстанции, попадает в зону действия направленных токовых защит ну-

левой последовательности, реагирующих на активный ток, и должен учитываться при расчёте их уставок.

Следует отметить, что при отсутствии в нейтрали сети заземляющего резистора токи нулевой последовательности в линиях в рассматриваемом случае протекать не будут, несмотря на наличие напряжения \bar{U}_0 на шинах (нет пути для протекания этих токов). Выше уже отмечалось, что при несимметрии по фазным сопротивлениям сети возможен обратный случай – когда при отсутствии напряжения \bar{U}_0 на шинах в линиях протекают токи нулевой последовательности. Это говорит о том, что небалансы по токам и напряжениям нулевой последовательности в некоторых случаях могут присутствовать по отдельности.

Непросто ответить на вопрос о том, какое численное значение неравенства ЭДС необходимо учитывать при расчётах рассматриваемой составляющей небаланса. По-видимому, это зависит от ряда обстоятельств:

- на каких сборных шинах определяется небаланс (питающихся непосредственно от генератора или «удалённых», отделённых от генератора на один или большее количество трансформаторов);

- схемы и параметров «предшествующей» питающему трансформатору сети;

- разновидности и параметров генераторов, питающих сеть, а также их нагрузки;

- параметров питающего трансформатора и т.д.

На практике значение рассматриваемой составляющей небаланса по напряжению $3U_0$ можно оценить, замерив напряжение на разомкнутом треугольнике трансформатора напряжения на рассматриваемых сборных шинах в режиме их холостого хода (при отсутствии несимметрии сети). Следует, однако, иметь в виду, что при изменении нагрузки генераторов (силовых трансформаторов) значение небаланса может изменяться.

Небаланс, вызванный несимметрией фазных нагрузок

Как правило, в сетях 6-35 кВ отсутствуют нагрузки, имеющие непосредственную связь с землёй, поэтому небаланс, вызванный неравенством фазных токов таких нагрузок, обычно не рассматривается.

Из-за несимметрии нагрузок в сети 0,4 кВ могут возникнуть разные токи в фазах сети высшего напряжения, которые могут привести к смещению нейтрали понижающих трансформаторов.

Если нейтраль понижающего трансформатора не заземлена, то такое смещение не приводит к небалансу по напряжениям и токам нулевой последовательности в сети 6-35 кВ, однако установка заземляющих резисторов в нейтральных понижающих трансформаторов (как, например, это описано в [8]), приводит к тому, что смещение их нейтралей вызывает появление дополнительного небаланса токов $I_{нб.нагр.}$ и напряжений $U_{нб.нагр.}$ нулевой последовательности. Этот вопрос требует дополнительной проработки.

Заключение

1. В настоящее время отсутствует методика выбора тока срабатывания направленных токовых защит от замыкания на землю в сетях 6-35 кВ в процессе проектирования. Это приводит к большому количеству неселективных срабатываний на начальной стадии эксплуатации до тех пор, пока правильные уставки не будут найдены опытным путём.
2. Для выбора тока срабатывания необходимо иметь сведения о видах и величинах небалансов в сети в нормальном режиме работы и при внешних замыканиях на землю.
3. Анализ разновидностей токов небаланса и методы их расчёта, описанные в работе, позволят специалистам повысить качество проектирования направленных токовых защит от ОЗЗ и, соответственно, эффективность их работы.

Литература

1. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. Направленные защиты. Влияние электрической дуги на направленные защиты // *Новости Электротехники*. – 2006. – № 1 (37).
2. Шалин А.И., Кондранина Е.А., Михель А.А. Об одном режиме работы распределительных сетей среднего напряжения (см. настоящий сборник).
3. Шабад М.А. Расчёты релейной защиты и автоматики распределительных сетей: Монография. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.
4. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 12. Токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110-500 кВ. Расчёты. – М.: Энергия, 1980. – 87 с.
5. Сирота И.М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. – Киев: Наукова Думка, 1983. – 267 с.
6. Шалин А.И., Хабаров А.М. Защита от замыканий на землю для пучков кабелей (см. настоящий сборник).
7. 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.
8. Шалин А.И. Защиты от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ. Пример расчёта уставок // *Новости Электротехники*. – 2005. – № 4 (34).
9. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 5. Защита блоков генератор-трансформатор и генератор-автотрансформатор. – М.-Л.: Энергия, 1963. – 112 с.
10. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ. (Библиотечка электротехника). – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. – Вып. 11(35). – 104 с.
11. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 368 с.