

Проблема надежного и быстрого определения места однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в сетях 6–35 кВ вновь приобретает актуальность в связи с наметившейся тенденцией перевода действия защит на отключение. Но, вследствие многообразия параметров сетей и применяемых на практике режимов заземления нейтралей, общепризнанных решений по построению защит от ОЗЗ нет. Об этом свидетельствует и одна из последних публикаций [1].

В своем материале наши петербургские авторы рассматривают вопросы негативного влияния на режимные параметры и соответственно на чувствительность защит от ОЗЗ величины переходного сопротивления  $R_{зам}$  в месте замыкания на землю. Они обращают внимание на эффективность незаслуженно мало реализуемых на практике направленных защит от ОЗЗ с рабочими сигналами «активная мощность» и «энергия нулевой последовательности», которые только в аварийном присоединении имеют противоположную направленность и повышенную величину.

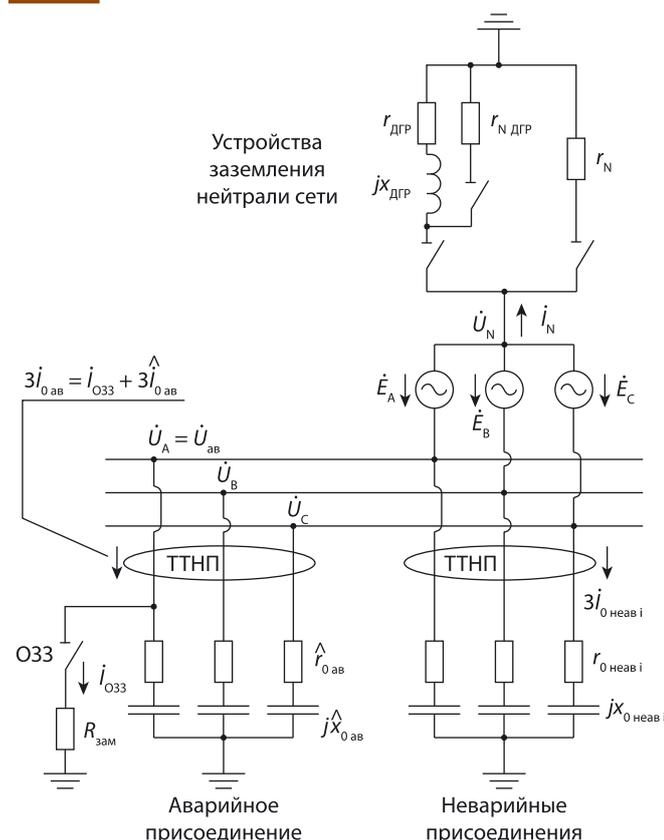
## ПЕРЕХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В МЕСТЕ ОЗЗ

### Влияние на режимные параметры и рабочие сигналы защит от ОЗЗ

В реальных режимах ОЗЗ напряжения, и особенно токи нулевой последовательности (НП), часто имеют несинусоидальный и импульсный характер. В этих условиях расчеты с использованием комплексных схем замещения трехфазной сети на составляющих основной частоты, строго говоря, являются некорректными.

Однако с целью получения базовых закономерностей влияния тех или иных параметров такие расчеты практикуются [2, 3]. Авторы настоящей статьи также сочли целесообразным вначале привести результаты выполненных на линейной модели сети исследований воздействия сопротивления  $R_{зам}$  на

• Рис. 1. Трехфазная схема замещения сети



режимные параметры ОЗЗ и на применяемые для определения аварийного фидера сигналы защит. Такие расчеты позволили уточнить подходы к анализу влияния нестабильного и нелинейного сопротивления  $R_{зам}$  на условия работы направленных защит, проведенному с привлечением осциллограмм реальных процессов однофазных повреждений изоляции.

#### РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЕЙ В РЕЖИМАХ ОЗЗ

Для анализа выбрана простейшая одноузловая схема замещения трехфазной сети, приведенная на рис. 1. Питаящая сеть представлена источником трехфазной синусоидальной ЭДС прямой последовательности. Относительно малые продольные сопротивления не учитываются. Показаны связанные с землей активно-емкостные сопротивления изоляции  $\dot{z}_0 = (r_0 + jx_0)$  радиально отходящих от центра питания нагрузочных присоединений. Полагаем, что емкостное сопротивление  $x_0$  имеет отрицательный знак. Отдельно выделено аварийное присоединение, в фазе А которого возникает замыкание на землю через сопротивление  $R_{зам}$ . Сопротивления изоляции этого присоединения помечены индексом «^». Трансформаторы ТТНП кабельного типа в голове присоединений измеряют утроенные токи  $3I_0$  нулевой последовательности при положительном, как это делается на практике, направлении токов в сторону нагрузки (земли).

Рассматриваются четыре варианта обустройства нейтрали:

- изолированная;
- резистивно-заземленная через сопротивление  $R_N$ ;
- компенсированная дугогасящим реактором (ДГР);
- комбинированная при шунтировании ДГР резистором.

Для расчета тока  $I_{ОЗЗ}$ , протекающего через ветвь с сопротивлением  $R_{зам}$ , может быть использована формула (1), выведенная с помощью теоремы об эквивалентном генераторе [4]:

$$I_{ОЗЗ} = \dot{E}_{0Г} / (R_{зам} + \dot{Z}_{0Г}), \tag{1}$$

где  $\dot{E}_{0Г}$  – вектор напряжения на аварийной фазе в исходном, до наступления ОЗЗ, режиме (в данном случае  $\dot{E}_{0Г} = \dot{U}_{Аиск}$ );

$\dot{Z}_{0Г}$  – эквивалентное относительно земли сопротивление трехфазной сети, внешней по отношению к ветви с сопротивлением  $R_{зам}$  при закорачивании всех имеющихся в сети ЭДС (в данном случае  $\dot{E}_A, \dot{E}_B$  и  $\dot{E}_C$ ).

При наличии в нейтрали сети сопротивления  $\dot{Z}_N$  (установлен ДГР или резистор), сопротивление  $\dot{Z}_{0Г}$  может быть выражено как параллельное соединении сопротивлений  $\dot{Z}_N$  и эквивалентного сопротивления изоляции трех фаз сети на землю  $\dot{Z}_{0\Sigma}$ :

$$\dot{Z}_{0Г} = \dot{Z}_N \cdot \dot{Z}_{0\Sigma} / (\dot{Z}_N + \dot{Z}_{0\Sigma}). \tag{2}$$

Леонид Кучумов, к.т.н.  
 Антон Кузнецов, к.т.н.  
 Денис Червочков,  
 ЗАО «НПФ «ЭНЕРГОСОЮЗ»,  
 г. Санкт-Петербург

Формуле (1) отвечает отображенная на рис. 2 эквивалентная схема замещения сети для расчета тока  $\hat{I}_{O33}$ . В развернутом виде при раздельном представлении аварийного и неаварийных присоединений, а также при изменении направления ЭДС  $\hat{E}_{0Г}$ , включенной в цепи аварийного фидера, расчетная схема сети для составляющих НП представлена на рис. 3.

Стрелки токов во всех присоединениях, подключенных к узлу с напряжением  $\hat{U}_0$ , в соответствии с общепринятыми представлениями направлены в сторону земли. В аварийном присоединении включен генератор с ЭДС  $\hat{E}_{0Г} = -\hat{U}_{Аиск}$ , который вырабатывает мощность  $3\hat{S}_{0Г} = 3P_{0Г} + j3Q_{0Г}$ , идущую на покрытие потерь в активных и реактивных сопротивлениях всех элементов сети, включая потери в сопротивлении  $R_{зам}$ :

$$\Delta P_{R_{зам}} = I_{O33}^2 \cdot R_{зам} = I_{O33} \cdot U_{зам} \quad (3)$$

Можно показать, что мощности к этому генератору передаются от энергосистемы на составляющих напряжения и тока прямой последовательности. О корректности схемы замещения свидетельствует полное совпадение результатов расчетов токов и напряжений НП с использованием трехфазной схемы рис. 1 и схемы рис. 3.

На рис. 3 показаны места измерений в узле  $\hat{U}_0$  токов НП отдельных присоединений, модули которых могут являться пусковыми сигналами ненаправленных защит от ОЗЗ. В направленных защитах применяются сигналы активной  $3P_0$  и реактивной  $3Q_0$  мощностей НП присоединений, которые рассчитываются с использованием информации о векторах  $\hat{I}_0$  и  $\hat{U}_0$  по формулам:

$$\begin{aligned} 3P_0 &= Re[3\hat{I}_0, U_0] = 3I_0 \cdot U_0 \cdot \cos\varphi_0; \\ 3Q_0 &= Im[3\hat{I}_0, U_0] = 3I_0 \cdot U_0 \cdot \sin\varphi_0. \end{aligned} \quad (4)$$

### ЗНАКИ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НП КАК ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ПРИЗНАКИ АВАРИЙНОГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ

В узле подключения аварийного и неаварийных присоединений соблюдается баланс токов и мощностей:

$$\begin{aligned} \sum_i 3\hat{I}_{0\text{ неав } i} + 3\hat{I}_{0\text{ ав } i} + \hat{I}_N &= -3\hat{I}_{0\text{ ав } i}; \\ \sum_i 3P_{0\text{ неав } i} + P_N &= -3P_{0\text{ ав } i}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\hat{I}_N$  и  $P_N$  – соответственно ток и потери активной мощности в устройствах, включенных в нейтраль сети.

Следовательно, при однотипном для всех присоединений выполнении монтажа цепей измерения токов НП признаком аварийного присоединения является отрицательный знак мощности  $3P_{0\text{ ав}}$  при ее наибольшей величине. Мощности  $3P_{0\text{ неав}}$  неаварийных присоединений имеют положительные знаки и заметно меньше собственные величины. Указанные отличительные признаки сигналов  $3P_0$  сохраняются при любых типах заземления нейтрали, и поэтому сигналы  $3P_0$  могут быть названы универсальными для направленных ваттметрических защит. Надежность работы подобных защит, анализирующих активные мощности НП, резко возрастает при установке в нейтрали сети резистора.

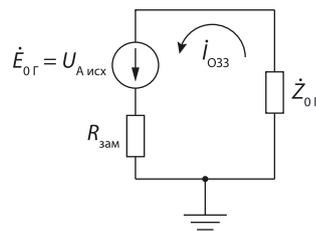
Обратим внимание на то, что при наличии в режиме ОЗЗ переходного сопротивления  $R_{зам}$  под его влиянием уменьшаются напряжения, токи и мощности НП. Это должно отрицательно влиять на чувствительность направленных защит, использующих рассчитанные по (4) сигналы  $3P_{0\text{ ав}}$ , равные мощностям активных потерь во внешней по отношению к аварийному присоединению сети.

Обсуждаемые в материале далее расчеты с использованием математической модели сети убедительно подтверждают сказанное, но расчеты также показывают на возможность в этих условиях повышения надежности работы защит за счет представления пускового сигнала  $3P_{0\text{ ав}}$  защиты аварийного присоединения в виде суммы всех активных потерь в сети на составляющих НП, включая доминирующие в ряде режимов потерь  $\Delta P_{R_{зам}}$ .

Представляется также полезным упоминание здесь об имеющемся практическом опыте реализации в сетях с изолированной нейтралью направленных защит от ОЗЗ типа ЗЗН и ЗЗП-1М [5], использующих в качестве рабочих сигналов реактивные токи НП (мощности  $3Q_0$ ). В аварийном присоединении эти мощности имеют индуктивный характер, а в неаварийных – емкостный (соответственно противоположные

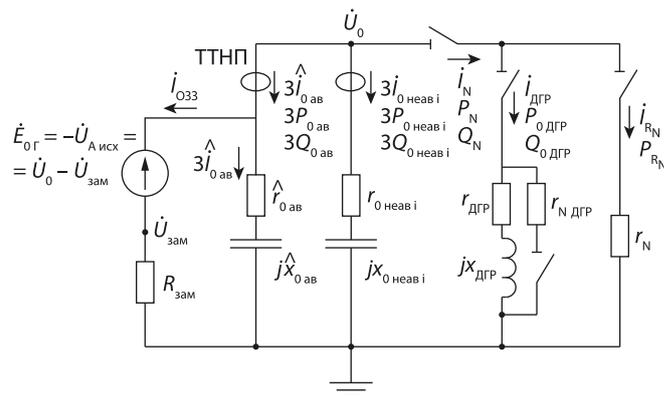
Схема замещения сети на составляющих нулевой последовательности

Рис. 2 •



Расчетная схема нулевой последовательности для сети, отображенной на рис. 1

Рис. 3 •



знаки). Однако тенденции к прекращению эксплуатации сетей с изолированной нейтралью и возникающая явная некорректность в работе подобных защит при ОЗЗ через переходное активное сопротивление, а также в сетях с компенсированной и резистивной нейтралью позволяют полагать, что совершенствование подобных разработок малоперспективно.

### ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАМЫКАНИЯ НА РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И СИГНАЛЫ ЗАЩИТ ОТ ОЗЗ

С использованием обособанных выше моделей сетей в несимметричных режимах ОЗЗ были выполнены представленные на рис. 4 и рис. 5 расчеты, позволяющие проследить основные закономерности влияния  $R_{зам}$  на напряжения, токи и мощности НП для всех применяемых на практике типов оборудования нейтрали.

Расчеты соответствуют варианту неучета в схеме замещения сопротивления изоляции на землю аварийного присоединения  $\hat{Z}_{0\text{ ав}}$ , когда ток  $\hat{I}_{O33}$  совпадает с доступным для измерений на подстанции током  $3I_{0\text{ ав}}$  (это допущение мало влияет на интересующие нас величины активных составляющих мощностей НП).

Использовались относительные единицы при базисных величинах  $U_{баз} = U_{ф\text{ ном}}, I_{баз} = I_{O33\text{ емк}} = U_{ф\text{ ном}} / x_{0\Sigma}$  и  $z_{баз} = U_{баз} / I_{баз} = x_{0\Sigma}$ . Активные сопротивления изоляции сети  $r_{0\Sigma}$  полагались равными 10% от соответствующих реактивных сопротивлений  $x_{0\Sigma}$  (в результате составляющие суммарного сопротивления изоляции сети относительно земли составили величины  $x_{0\Sigma} = 1,0$  о.е. и  $r_{0\Sigma} = 0,1$  о.е.).

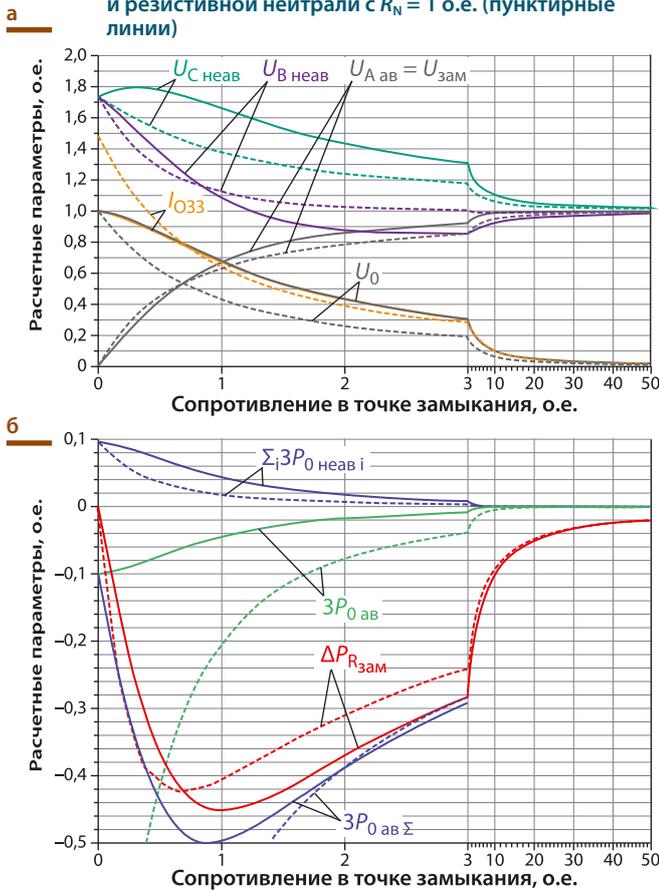
В режимах с ДГР рассматривался случай 100%-ной компенсации емкостного тока с соответствующими сопротивлениями реактора  $x_{ДГР} = 1,0$  о.е. и  $r_{ДГР} = 0,02$  о.е. Диапазон варьирования сопротивления  $R_{зам}$  принимался в пределах  $R_{зам} = (0 \div 50)$  о.е. относительно сопротивления  $x_{0\Sigma}$ , что, например, для сети класса 10 кВ при величинах  $I_{O33\text{ емк}} = 80$  А и  $x_{0\Sigma} = U_{ф\text{ ном}} / I_{O33} = (10000 / \sqrt{3}) / 80 = 72,2$  [Ом] даст значение  $R_{зам} = 0 \div 3,6$  [кОм].

Обсудим результаты расчетов для четырех применяемых режимов нейтралей.

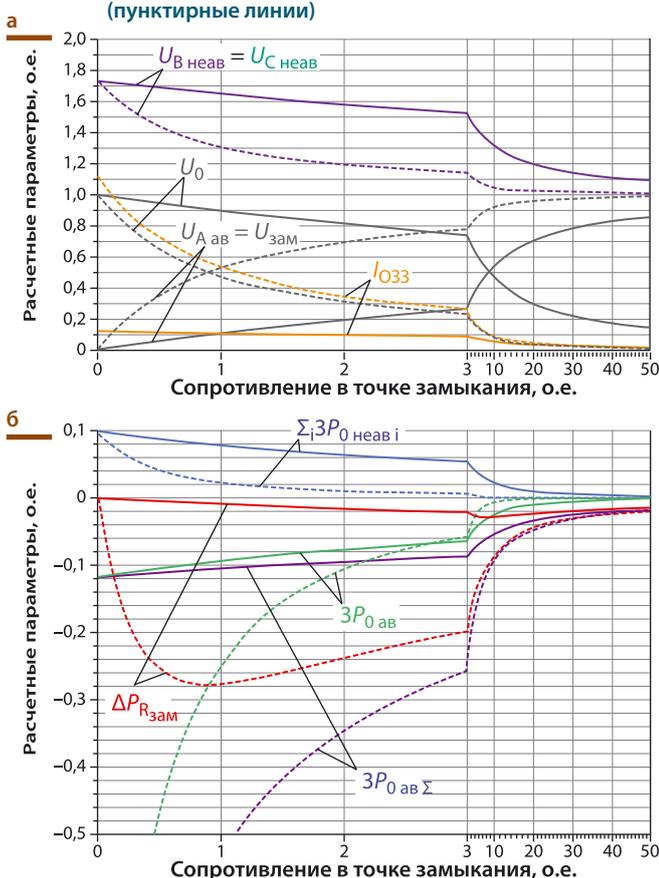
#### Нейтраль изолирована

На рис. 4 а,б сплошными линиями построены зависимости, характеризующие режим ОЗЗ при изолированной нейтрали ▶

• **Рис. 4.** Режимные параметры ОЗЗ в вариантах изолированной нейтрали (сплошные линии) и резистивной нейтрали с  $R_N = 1$  о.е. (пунктирные линии)



• **Рис. 5.** Режимные параметры ОЗЗ в вариантах компенсированной нейтрали (сплошные линии) и включения параллельно ДГР резистора с  $R_N = 1$  о.е. (пунктирные линии)



► (зависимости при резистивно заземленной нейтрали, показанные пунктирными линиями, обсуждаются ниже).

Согласно рис. 4а при росте переходного сопротивления  $R_{зам}$  относительно нуля происходит интенсивное уменьшение напряжения  $U_0$  и тока  $I_{ОЗЗ}$  при увеличении напряжения на замкнувшейся фазе  $U_{А ав} = U_{зам}$ . Если при металлическом ОЗЗ имеем  $U_{зам} = 0$  и  $U_0 = I_{ОЗЗ} = 1$  о.е., то при  $R_{зам} = 1$  о.е. данные параметры равны:  $U_{зам} = U_0 = I_{ОЗЗ} = 0,7$  о.е., а при  $R_{зам} = 10$  о.е. они составляют соответственно  $U_{зам} = 0,99$  о.е. и  $U_0 = I_{ОЗЗ} = 0,099$  о.е.

С ростом  $R_{зам}$  наблюдаются специфические расхождения в уровнях напряжений неаварийных в данном случае фаз В и С, когда  $U_{неав В} > U_{неав С}$ , а при  $R_{зам} \geq 1,8$  о.е. напряжение фазы В становится даже меньше напряжения аварийной фазы А.

По рис. 4б можно проследить закономерности влияния  $R_{зам}$  на сигналы активных мощностей  $ZP_0$  присоединений, которые используются в качестве рабочих сигналов направленных защит.

В аварийном присоединении мощность  $ZP_{0 ав}$  отрицательна и при  $R_{зам} = 0$  она составляет максимальную величину  $ZP_{0 ав} = 0,1$  о.е., соответствующую потерям в активных сопротивлениях изоляции сети относительно земли (принято  $r_{0 \Sigma} = 0,1$  о.е.).

В неаварийных присоединениях мощности  $ZP_{0 неав}$  имеют противоположный знак (они положительны), а показанная на рис. 4б их суммарная величина  $\sum_i ZP_{0 неав i}$  равна мощности  $ZP_{0 ав}$  в аварийном фидере. Быстрое затухание сигналов  $ZP_0$  с ростом  $R_{зам}$  должно неблагоприятно сказываться на надежности работы защит с такими рабочими сигналами.

Принципиального повышения чувствительности и селективности направленных защит с «ваттметрическими» рабочими сигналами можно достичь за счет прибавления к сигналу  $ZP_{0 ав}$  защиты аварийного фидера, рассчитанной по (3) и взятой с обратным знаком активной мощности  $\Delta P_{R_{зам}}$ . Основанием для такого решения является безусловный факт выделения потерь  $\Delta P_{R_{зам}}$  только в аварийном фидере.

Максимальное значение мощности  $\Delta P_{R_{зам}}$  достигает при  $R_{зам} = 1,0$  о.е., когда она составляет 0,45 о.е., что при данных условиях в 10 раз больше традиционно используемой направленными защитами мощности  $ZP_{0 ав} = 0,042$  о.е.

При  $R_{зам} > 1,0$  о.е. показанный на рис. 4б суммарный сигнал  $ZP_{0 ав \Sigma} = ZP_{0 ав} + \Delta P_{R_{зам}}$  становится практически равным мощности  $\Delta P_{R_{зам}}$ , и он даже при  $R_{зам} = 10$  о.е. остается соизмеримым с величиной наибольшего сигнала  $ZP_{0 ав} = 0,1$  о.е., которая фиксируется только при  $R_{зам} = 0$ .

#### Резистивно заземленная нейтраль

Постоянное включение в нейтраль сети резисторов  $R_N$  обычно обосновывается двумя вносимыми эффектами: при выборе  $R_N \leq x_{0 \Sigma}$  ( $R_N \leq 1,0$  о.е.) достигается приемлемое уменьшение кратности перенапряжений при дуговых ОЗЗ; при  $R_N \ll 1,0$  о.е. создаются условия для существования устойчивого ОЗЗ и надежной селективной работы простых токовых защит от ОЗЗ.

Расчеты зависимостей режимных параметров ОЗЗ от  $R_{зам}$  для варианта установки резистора  $R_N = 1,0$  о.е. представлены на рис. 4 а,б пунктирными линиями. Такой резистор при  $R_{зам} = 0$  увеличивает ток ОЗЗ до значения  $I_{ОЗЗ} \cong \sqrt{2} I_{ОЗЗ эмк} = 1,41$  о.е. По сравнению с вариантом сети с изолированной нейтралью наличие резистора приводит к более интенсивному снижению напряжений на неповрежденных фазах и тока в месте ОЗЗ при увеличении  $R_{зам}$ .

Измеряемый в аварийном присоединении сигнал  $ZP_{0 ав}$  направленной защиты за счет существования потерь в резисторе  $\Delta P_{R_N} = U_0^2 / R_N$  принципиально повысился по сравнению с вариантом изолированной нейтрали, особенно при  $R_N < 2,0$  о.е. И это благоприятно для работы «ваттметровых» защит. Но тем не менее при  $R_{зам} > 5$  о.е. сигнал  $ZP_{0 ав}$  заметно ослабевает, и для повышения чувствительности защит здесь также было бы полезным формирование пускового сигнала  $ZP_{0 ав \Sigma}$  защиты аварийного фидера в виде суммы мощностей  $ZP_{0 ав}$  и  $\Delta P_{R_{зам}}$ . Построенные на рис. 4б зависимости от  $R_{зам}$  мощностей  $ZP_{0 ав}$ ,  $\Delta P_{R_{зам}}$  и  $ZP_{0 ав \Sigma}$  отчетливо показывают полезность такого решения: сигнал  $ZP_{0 ав \Sigma}$  сохраняет повышенное значение вплоть до  $R_{зам} = 50$  о.е.

### Компенсированная нейтраль

Зависимости от  $R_{зам}$  параметров этого распространено в стране режима заземления нейтрали представлены на рис. 5 (сплошные линии). За счет компенсации реактивной составляющей тока ОЗЗ возникают эффекты относительно медленного роста при увеличении  $R_{зам}$  напряжения  $U_{ав}$  на поврежденной фазе и соответственно медленного спада напряжения  $U_0$  по сравнению с его значением  $U_0 = 1,0$  о.е. при металлическом ОЗЗ.

Также отчетливо видно, что при резонансной настройке ДГР ток ОЗЗ остается малым при любых величинах сопротивления  $R_{зам}$ , и поэтому учет малых потерь в переходном сопротивлении  $\Delta P_{R_{зам}} = I_{ОЗЗ}^2 \cdot R_{зам}$  практически не может способствовать увеличению рабочего сигнала направленных защит. Работоспособность направленных защит с рабочими сигналами  $3P_0$  в этих условиях сохраняется только за счет различных величин и знаков мощностей  $3P_{0ав}$  и  $3P_{0неав}$ . Некоторым благоприятным фактором здесь является увеличение мощности  $3P_{0ав}$  за счет активных потерь в ДГР.

### Комбинированная нейтраль

Для повышения надежности и селективности работы направленных защит НП в сетях с ДГР целесообразно применять известный прием кратковременного включения в режиме ОЗЗ параллельно реактору резистора  $R_{НДГР}$ , создающего дополнительные активные потери и соответственно увеличивающего сигнал  $3P_{0ав}$  аварийного присоединения. Многие производители ДГР устанавливают сопротивления  $R_N$  во вторичную низковольтную обмотку реактора и используют для его включения и отключения управляемые контакторы [6].

На рис. 5 пунктирными линиями показаны зависимости от  $R_{зам}$  режимных параметров при включении параллельно ДГР резистора с величиной сопротивления  $R_{НДГР} = 1,0$  о.е. При этом в режиме ОЗЗ резко увеличиваются ток  $I_{ОЗЗ}$  и напряжение  $U_{зам}$ . Также увеличивается сигнал  $3P_{0ав\Sigma} = 3P_{0ав} + \Delta P_{R_N} + \Delta P_{R_{зам}}$  за счет добавления к нему мощностей  $\Delta P_{R_N}$  и  $\Delta P_{R_{зам}}$ , что способствует распознаванию аварийного фидера.

Итак, выполненные расчеты режимных параметров ОЗЗ через переходное сопротивление подтвердили известные факты существенного снижения в этих условиях используемых в направленных защитах рабочих сигналов  $3P_0$  и, как следствие, повышения вероятности ложных срабатываний защит.

Но также было показано, что принципиального повышения чувствительности направленных защит можно достичь за счет расчета активных потерь  $\Delta P_{R_{зам}}$  в месте замыкания и сложения этих потерь (со знаком «-») с сигналом  $3P_{0ав}$  аварийного присоединения. В результате в этом присоединении будет фиксироваться отрицательная и наибольшая по величине мощность  $3P_{0ав\Sigma} = 3P_{0ав} + \Delta P_{R_{зам}}$ , резко выделяющаяся по сравнению с мощностями  $3P_{0неав}$  неаварийных присоединений, имеющих другой знак и уровни, пропорциональные относительно небольшим значениям активных потерь в изоляции от токов НП отдельных неаварийных присоединений.

### ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ ЗА СЧЕТ УЧЕТА АКТИВНЫХ ПОТЕРЬ В ПЕРЕХОДНОМ СОПРОТИВЛЕНИИ ЗАМКНУТЫХ НА ЗЕМЛЮ

В рабочих сигналах современных микропроцессорных направленных защит мощности потерь  $\Delta P_{R_{зам}}$  в месте ОЗЗ не используются, что обусловлено определенными сложностями их расчета по доступной для измерения информации о напряжениях и токах НП присоединений. Если в расчетах на математической модели поврежденное присоединение и фаза назначались и была возможность расчета  $\Delta P_{R_{зам}}$  по (3), то в действующих сетях алгоритм таких расчетов неочевиден.

Проведенный анализ показал на приемлемость следующих действий по реализации поставленной задачи.

По факту наступления режима ОЗЗ, о чем свидетельствует, например, превышение уставки срабатывания защит по напряжению  $U_0$ , запускаются процедуры определения поврежденной фазы. При близком к металлическому ОЗЗ очевидна справедливость признака наименьшего значения напряжения на поврежденной фазе. Но при  $R_{зам} \neq 0$  этот признак согласно расчетам на рис. 5а может использоваться только в вариантах компенсиро-

ванной и комбинированной нейтрали сети. По данным рис. 4а, в сетях с изолированной нейтралью при  $R_{зам} > 2,0$  о.е. напряжение на неаварийной фазе может быть даже меньшим по значению, чем на поврежденной, а в сетях с резистивным заземлением нейтрали при повышенных значениях  $R_{зам}$  напряжения на аварийной и неповрежденных фазах соизмеримы.

Могут использоваться и другие признаки для определения аварийной фазы, например по появлению в ней характерных провалов напряжения в моменты бросков тока  $3I_0$  и т.п.

После определения аварийной фазы появляется возможность использования теоретического положения о наличии в этой фазе аварийного присоединения «генератора НП», покрывающего все активные и реактивные потери в сети на составляющих НП. ЭДС  $\dot{E}_{0Г}$  этого генератора равна взятому с обратным знаком напряжению  $\dot{U}_{ав,фаза\text{исх}}$  на аварийной фазе в исходном режиме, и она при обычно приемлемом допущении о неучете в схеме замещения по рис. 3 собственных сопротивлений  $\hat{r}_{0ав}$  и  $\hat{x}_{0ав}$  аварийного присоединения может быть также выражена через измеряемые в режиме ОЗЗ параметры  $\dot{U}_0$  и  $\dot{U}_{зам} = \dot{U}_{ав,фаза}$ :

$$\dot{E}_{0Г} = -\dot{U}_{ав,фаза\text{исх}} \cong \dot{U}_0 - \dot{U}_{ав,фаза}. \quad (6)$$

Расчет активной мощности аварийного присоединения по формуле (4) с заменой вектора  $\dot{U}_0$  на вектор  $\dot{E}_{0Г}$  дает мощность  $3P_{0ав\Sigma}$  суммарных потерь в сети от токов НП. Определение мощностей НП неаварийных присоединений при такой же замене параметров напряжения, хотя и дает несколько завышенные значения этих мощностей, но, как показывают расчеты, вследствие относительно малых величин токов  $3I_{0неав}$  (преимущественно емкостного характера) проблем со строгим выделением искомого аварийного фидера не возникает.

В редких случаях неуверенного выполнения этапа определения замкнувшейся на землю фазы следует отказаться от учета потерь  $\Delta P_{R_{зам}}$  и осуществить запуск расчета активных мощностей  $3P_0$  присоединений по формуле (4) с последующим выделением аварийного фидера по признакам наибольшей и имеющей отрицательный знак мощности  $3P_{0ав}$ .

### ВЫВОДЫ

Обоснована схема замещения сети с однофазными через переходное сопротивление замыканиями на землю и представлены в виде номограмм результаты расчетов влияния этого сопротивления на режимные параметры ОЗЗ при всех применяемых на практике схемах заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ.

Показана универсальность и эффективность направленных защит от ОЗЗ, использующих пусковые сигналы направления активной мощности и энергии нулевой последовательности в присоединениях. Для существенного повышения чувствительности и селективности таких защит предложены алгоритмы учета в рабочих сигналах защит аварийных присоединений активных потерь в переходном сопротивлении замыкания.

**В следующем номере журнала будут представлены технические решения по организации работы направленных защит в режимах дуговых и неустойчивых ОЗЗ с использованием пусковых сигналов направления мгновенной мощности и энергии НП.**

### ЛИТЕРАТУРА

1. Горюнов В.А. Однофазное замыкание на землю. Можно ли решить проблему? // Новости ЭлектроТехники. 2017. №2(104)–№3(105).
2. Евдокунин Г.А., Титенков С.С. Резистивное заземление нейтрали сетей 6–10 кВ. СПб.: Терция, 2009.
3. Цапенко Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Том 1. М.–Л.: Энергия, 1966.
5. Соловьев А.Л. Выбор характеристик и уставок защиты электрооборудования с использованием микропроцессорных терминалов. Ч. 2. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2008.
6. Назарычев А.Н., Титенков С.С., Пугачев А.А. Комплексные инновационные решения по заземлению нейтралей в сетях 6–35 кВ // Электроэнергия: передача и распределение. 2016. № 3(36).