

Релейная защита от замыканий на землю в сетях с резистивным заземлением нейтрали

ГОРЮНОВ В. А., инженер, ООО «Болид»
vagorunov@mail.ru

Организация режима резистивного заземления нейтрали позволяет реализовать селективную систему защиты от замыканий на землю. В сети с низкоомным заземлением нейтрали хорошо работают ненаправленные токовые защиты. В сети с высокоомным заземлением нейтрали наиболее эффективны устройства защиты, реагирующие на активную мощность нулевой последовательности (НП). Централизованные устройства защиты не требуют отстройки уставок от активной мощности НП, вызванной искажениями сигналов тока и напряжения, что позволяет повысить чувствительность к замыканиям на землю.

К л ю ч е в ы е с л о в а: релейная защита, замыкание на землю, защиты от замыканий на землю, резистивное заземление нейтрали.

Постепенный переход к использованию резистивного заземления нейтрали позволяет решить проблему перенапряжений, а также организовать эффективную систему защиты от замыканий на землю. Большинство аварийных ситуаций в сетях 6–35 кВ возникает по причине замыканий на землю [1]. Снизить повреждаемость и увеличить число самоустраняющихся замыканий возможно посредством компенсации ёмкостных токов замыкания на землю.

Однако значительная (тем более полная) компенсация токов однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) снижает работоспособность токовых защит от ОЗЗ. По этой причине в России для сетей с компенсированной нейтралью разработаны и эксплуатируются специальные устройства защиты, реагирующие как на переходные составляющие токов и напряжений НП в момент замыкания, так и на высшие гармонические составляющие.

Большинство зарубежных производителей защит используют в микропроцессорных терминалах и устройствах защиты только токовые и токовые направленные защиты от ОЗЗ. Это связано в первую очередь с режимами заземления нейтрали, принятыми за рубежом: заземление нейтрали через резистор или через дугогасящий реактор с шунтирующим резистором и глухое заземление нейтрали. Эти режимы не только обеспечивают низкий уровень перенапряжений при ОЗЗ, но также позволяют организовать селективную защиту присоединений от ОЗЗ.

Токовые защиты от ОЗЗ в числе прочих преимуществ просты в реализации. Их можно организовать как с использованием электромеханических реле, так и на микропроцессорных терминалах защиты присоединений с функцией защиты 50/51N (по коду ANSI). Ток срабатывания для этого типа защит следует отстраивать от собственного ёмкостного тока присоединения

$$I_{c.з} \geq k_{отс} k_{бр} I_{c.прис.мах} \quad (1)$$

где $k_{отс} = 1,2 \div 1,3$ — коэффициент отстройки; $k_{бр} = 1 \div 5$ — коэффициент, учитывающий бросок ёмкостного тока в момент возникновения ОЗЗ, способность реле реагировать на него, наличие резистивного заземления и выдержки време-

ни; $I_{c.прис.мах}$ — максимальное значение собственного ёмкостного тока защищаемого присоединения при внешнем ОЗЗ.

При этом в случае замыкания на защищаемом присоединении должна обеспечиваться требуемая чувствительность защиты

$$k_{ч} = \frac{I_{ОЗЗ}}{I_{c.з}} > 1,5. \quad (2)$$

Для малочисленных присоединений с большим ёмкостным током чувствительность защит зачастую оказывается недостаточной в сетях как с изолированной нейтралью, так и с компенсацией ёмкостных токов, в том числе при перекомпенсации. Активный ток резистора позволяет увеличивать общий ток НП до уровня, при котором обеспечивается необходимый коэффициент чувствительности. Ток срабатывания защиты, отстроенный от собственного ёмкостного тока присоединения, при этом не изменяется.

В зависимости от числа присоединений и соотношения их ёмкостных токов требуемый активный ток может втрое превышать суммарный ёмкостный ток. Из выражений (1) и (2) понятно, что ток замыкания должен отличаться от собственного ёмкостного тока присоединения на значение произведения $k_{отс} k_{бр} k_{ч}$. Например, для сети с резистивным заземлением нейтрали можно принять $k_{бр} = 2$, тогда $k_{отс} k_{бр} k_{ч} = 1,2 \cdot 2 \cdot 1,5 = 3,6$. Это свидетельствует о преимуществе релейной защиты на токовых реле при организации низкоомного режима заземления нейтрали, когда ток резистора значительно превышает ёмкостный ток ОЗЗ.

При недостаточной чувствительности токовых защит возможно применение направленных токовых защит НП, имеющих код 67N по классификации ANSI. Отстройка только от токов небаланса значительно повышает чувствительность защиты, однако такие защиты в значительной мере подвержены неселективным действиям при перемежающихся дуговых замыканиях и субгармонических колебаниях в процессе включения присоединений [2].

На рис. 1 представлена осциллограмма тока неповреждённого присоединения и напряжения НП при дуговом замыкании

на землю (ДЗЗ) в кабельной сети 10 кВ и расчётный угол между током и напряжением, определённый по одному из известных алгоритмов. Сигнал тока НП вводного присоединения записан посредством трансформатора тока НП (ТНП) при вторичной нагрузке не более 0,1 Ом, а напряжение НП снималось с разомкнутого треугольника трансформатора напряжения. На рис. 1 видно, как расчётный угол непрерывно изменяется. В зависимости от алгоритма он может выходить за пределы зоны действия защиты, что приводит к её неселективному действию.

В сетях с воздушными линиями электропередачи число ДЗЗ превалирует над остальными, а в кабельных сетях достигает 27 % [3]. Это приводит к неселективной работе направленных защит, что в свою очередь рождает устойчивое мнение о неработоспособности защит от ОЗЗ в целом.

Кроме направленных защит, многие зарубежные производители предлагают защиты, реагирующие на активный ток. Последний можно рассчитывать непосредственно по углу между током и напряжением НП, но тогда проявляются все недостатки направленных защит. Более эффективный метод — ваттметрический, основанный на расчёте активной мощности НП, который довольно широко используется в зарубежных микропроцессорных терминалах защиты. Известно, что ток от подключённых к нейтрали устройств протекает только в месте повреждения (в повреждённом присоединении), что позволяет организовать защиты, реагирующие на активную мощность НП.

Опыты замыкания на землю в кабельно-воздушной сети 10 кВ с резистивным заземлением показали, что ваттметрический принцип весьма эффективен как при «металлических» ОЗЗ, так и ДЗЗ. В проведённых исследованиях ток повреждённого присоединения регистрировался с помощью трансформатора тока классом точности 0,5, а напряжение снималось с нейтрали силового трансформатора посредством делителя напряжения.

При «металлическом» замыкании в сети с резистивным заземлением нейтрали в неповреждённых присоединениях протекает только ёмкостный ток (рис. 2, а, слева), поэтому активная мощность НП оказывается близкой к нулю и определяется в основном погрешностью ТНП. В повреждённом присоединении протекает сумма ёмкостного и активного то-

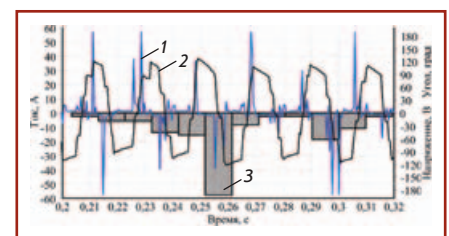


Рис. 1. Осциллограммы тока $3I_0$ (1) и напряжения $3U_0$ (2) НП при перемежающемся замыкании в кабельной сети 10 кВ, а также диаграмма условного расчётного угла (3)

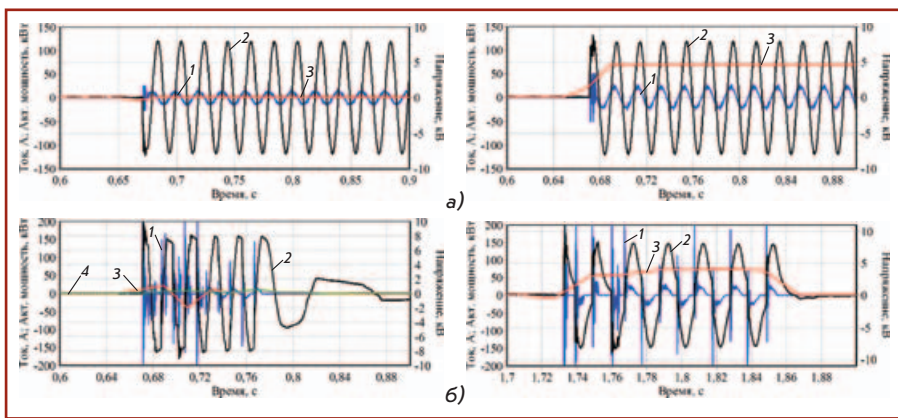


Рис. 2. Осциллограммы тока I_0 (1), напряжения U_N (2) НП и активной мощности в месте ОЗЗ (3) при «металлическом» ОЗЗ (а), а также тока I_0 (1), напряжения U_N (2), активной мощности [150 точек/период] (3), активной мощности [1500 точек/период] (4) в случае ДЗЗ (б) в сети 10 кВ промышленного предприятия с резистивно-заземлённой нейтралью ($R = 500 \text{ Ом}$) при внешнем (слева) и внутреннем (справа) замыканиях

ков, расчётная активная мощность при этом должна быть равна мощности установленного в нейтраль резистора.

Активная мощность НП определяется интегралом (за период промышленной частоты) произведения мгновенных значений тока и напряжения НП. Резистор сопротивлением 500 Ом в сети 10 кВ обеспечивает активную мощность 66,6 кВт, что подтверждается осциллограммой на рис. 2, а, справа). Дуговое замыкание — более сложный процесс с точки зрения влияния, оказываемого активным сопротивлением на нейтраль сети. Ток в неповреждённых присоединениях имеет ярко выраженный импульсный характер, поэтому возможно неселективное действие защиты.

Из рис. 2, б (слева) видно, что с повышением частоты дискретизации возрастает точность расчёта активной мощности НП, которая равна активной мощности утечки через распределённую активную проводимость кабельных и воздушных линий. Это связано с необходимостью учёта в расчётах (при повышенной частоте дискретизации) всей кривой тока (используется более полная информация).

Если мгновенное действие защиты не требуется, возможно усреднение мощности за 3–6 периодов, что позволит обеспечить устойчивую работу защиты при ДЗЗ, не прибегая к увеличению частоты дискретизации или загромождению уставок по активной мощности НП. При этом в повреждённом присоединении расчётная активная мощность снижается незначительно и, по-прежнему, практически равна мощности резистора (рис. 2, б, справа).

В неповреждённых присоединениях протекает только активный ток, обусловленный активной проводимостью линий электропередачи и электрических машин. Для оценки возможной активной мощности НП в неповреждённых присоединениях были проанализированы результаты многочисленных опытов ОЗЗ в сетях 10 кВ. Полученные данные показывают, что отношение активной мощности НП (обусловленной током активной утечки) к ёмкостному току линии составляет 240–

280 Вт/А для сети с кабелями, имеющими бумажно-масляную изоляцию, и 170 Вт/А для сети, где доля кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена весьма значительна.

При этом в неповреждённых присоединениях активная мощность НП имеет отрицательный знак, тогда отстройка от этой мощности требуется только при отсутствии фазировки ТННП на подстанции. Однако даже при выполнении фазировки применяется более тяжёлое условие отстройки устройства защиты — учёт угловой погрешности ТННП и трансформаторов напряжения (ТН).

При ёмкостном токе 1 А на каждый градус угловой погрешности значение расчётной активной мощности увеличивается на 150 Вт (для сети 10 кВ). Анализ результатов мониторинга ёмкостных токов присоединений при замыканиях на землю нескольких подстанций 10 кВ в течение трёх лет показал, что погрешность ТННП и высшие гармоники в ёмкостных токах вносят дополнительные искажения в расчётную активную мощность — не более 1000 Вт на 1 А ёмкостного тока (рис. 3). При измерениях нагрузка на ТННП не превышала 0,1 Ом.

Другая известная проблема снижения чувствительности защит — замыкание через переходное сопротивление, при котором уменьшаются ток и напряжение НП и, как следствие, мощность НП. Поэтому защиты должны иметь автоматически изменяющуюся уставку по активной мощности или току, зависящую от напряжения НП. Для защиты с автоматической коррекцией уставки будет достаточно обеспечить требуемый коэффициент чувствительности, отстроив при этом защиту от искажений расчётной активной мощности, вызванных погрешностями ТННП и ТН. Далее приведено условие выбора уставки для сети 10 кВ

$$k_{\text{отс}} P_{\text{погр}} < P_{0\text{уст}} < \frac{P_R}{k_{\text{ч}}} \quad (3)$$

где $P_{\text{погр}} = 1000 I_{\text{с,прис}}^2$ но не менее 5000 Вт (см. рис. 3); P_R — активная мощность резистора в нейтрали сети, $k_{\text{ч}}$ —

коэффициент чувствительности для линий (1,5) и двигателей (2).

Для защит, не имеющих коррекцию уставки, следует принимать уставку активной мощности НП, исходя из требуемой чувствительности к ОЗЗ через максимальные переходные сопротивления. Напряжение НП во время пуска защит от замыканий на землю определяет значение максимального переходного сопротивления в месте замыкания, при котором защита реагирует на ОЗЗ (рис. 4). При этом активная мощность, выделяемая резистором, снижается в квадратичной зависимости от напряжения НП, что приводит к уменьшению либо уставки, либо номинального значения резистора в нейтрали сети при значительной ожидаемой погрешности расчётной активной мощности НП по условию (3).

Пример расчёта. Для сети 10 кВ с суммарным ёмкостным током 10 А и максимальным ёмкостным током присоединения 5 А максимальная уставка по активной мощности будет 7,5 кВт. Если уставка по напряжению составляет 30 В, пуск защиты во время замыкания через переходное сопротивление обеспечивается при предельном сопротивлении $1,06 X_{\text{сз}}$ (см. рис. 4). Для данной сети это будет соответствовать 1,8 кОм. Ток при этом также пропорционально уменьшится, что приведёт к снижению активной мощности в 11,1 раза. Таким образом, для обеспечения работы защиты в указанном режиме необходимо подобрать минимальную мощность резистора $P_R = 11,1 k_{\text{отс}} P_{\text{погр}} k_{\text{ч}} = 11,1 \cdot 1,5 \cdot 5 \cdot 1,5 = 125 \text{ кВт}$.

Полученная мощность для сети 10 кВ соответствует резистору сопротивлением 250 Ом. В случае если замыкания через большие переходные сопротивления маловероятны (кабельные сети), для обеспечения требуемой чувствитель-

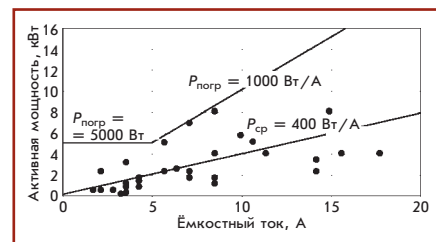


Рис. 3. Расчётная активная мощность НП присоединений в момент замыкания на землю по отношению к ёмкостным токам присоединений

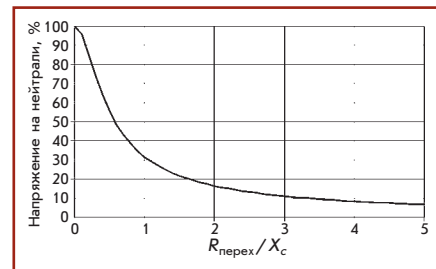


Рис. 4. Зависимость напряжения НП от отношения переходного сопротивления в месте замыкания к эквивалентному ёмкостному сопротивлению сети

ности будет достаточно резистора номинальным сопротивлением 2500 Ом.

Централизованные защиты от ОЗЗ позволяют селективно выделять повреждённое присоединение по активному току или мощности, не отстраивая уставки от мощности активных потерь и искажений. При этом такие защиты не ограничены по чувствительности и требуют только введения уставки по минимальному значению активной мощности. Централизованные устройства удобнее применять при организации системы защиты от ОЗЗ без модернизации всей релейной защиты подстанции (например, устройства МКЗЗГ-В4 производства ЗАО НОЦ «ЭСТРА» НГТУ и Бреслер-0117.080 производства НПП «БРЕСЛЕР»).

Защита разветвлённой сети от замыканий на землю при низкоомном заземлении нейтрали обеспечивается посредством токовых защит НР (50/51N), требующих возможности ликвидации аварийного режима, а значит, и наличия автоматического включения резерва. Замыкания в сетях с высокоомным резистивным заземлением нейтрали допускается не отключать до устранения повреждения, но при этом необходимо размещение защит, реагирующих на активную мощность НР.

Современные устройства защиты могут собирать и передавать данные в сис-

тему диспетчерского управления, выполнять мониторинг, поэтому время определения повреждённого присоединения можно свести к минимуму даже без его отключения средствами релейной защиты при отсутствии автоматического включения резерва, что особенно важно в таких обширных разветвлённых электрических сетях, как городские кабельные сети.

Организация системы защиты с отключением замыканий на землю положительно влияет на срок службы оборудования вследствие снижения продолжительности воздействия перенапряжений на изоляцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Гусенков А. В. Микропроцессорная система сигнализации и регистрации однофазных замыканий на землю в электрических сетях среднего напряжения // Релейщик. 2009. № 3.
3. Дмитриев С. Н., Нестеров С. В., Целебровский Ю. В. Городские электрические сети: обеспечение надёжности и безопасности электроснабжения // Новости электротехники. 2010. № 5 (65).

Перенапряжения при дуговых замыканиях в сети 6 кВ, питающей частотно-регулируемый электропривод

ЕФРЕМОВ И. А., доктор техн. наук, НГТУ
КУЗЬМИН А. А., БАЗАВЛУК А. А., МИХАЙЛОВСКИЙ Г. Г., инженеры
ООО «Болид»; ienay@yandex.ru

Приведены результаты исследований процессов в сетях с частотно-регулируемой двигательной нагрузкой при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ). Кроме того, рассмотрено влияние резистивного заземления нейтрали в сетях с указанной нагрузкой в условиях однофазного дугового замыкания (ОДЗ) на землю.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, перенапряжения, резистор, высшие гармоники, однофазное дуговое замыкание.

Одним из основных видов нагрузки большинства современных предприятий являются высоковольтные электроприводы. В процессе эксплуатации мощных электроприводов появляются проблемы пуска и регулирования частоты вращения двигателей, которые решаются посредством частотно-регулируемого привода (ЧРП). На крупных промышленных предприятиях схема электроснабжения представляет собой, как правило, разветвлённую кабельную сеть с изолированной нейтралью. В таких сетях основной вид аварий — устойчивые и дуговые ОЗЗ. Многократные загорания дуги часто приводят к возникновению перенапряжений, опасных для изоляции оборудования.

В 2010 г. в сети предприятия добычи угля Тугнуйского разреза ОАО «Суэк» была проведена серия экспериментов по

исследованию процессов в местах замыкания при «металлических» и дуговых ОЗЗ в целях измерения тока ОЗЗ, выяснения его гармонического состава и уровней перенапряжений. Определение ёмкостного тока ОЗЗ посредством искусственного «металлического» замыкания фазы сети на землю — прямой метод, позволяющий наиболее точно измерить значение тока ОЗЗ для текущей конфигурации схемы. Предлагаемый комплексный подход в части применения методики измерения ёмкостного тока ОЗЗ «напрямую», т. е. созданием искусственного ОЗЗ, включает в себя следующие этапы:

- осциллографирование сигналов фазных напряжений и тока ОЗЗ, что позволяет после конвертации проводить их

дальнейшую математическую обработку во внешних программных пакетах;

- определение ёмкостного тока основной частоты и его гармонических составляющих для известной конфигурации сети;
- анализ характера изменения фазных напряжений в нормальном режиме и переходных процессах возникновения и отключения замыкания на землю. Фактически это позволяет оценить «реакцию» сети на ОЗЗ [1].

Для создания ОДЗ используется искровой промежуток с шаровыми медными электродами определённого диаметра. Расстояние между электродами устанавливается таким образом, чтобы обеспечить пробой воздушного промежутка при прохождении подвижного электрода под неподвижным. За счёт определённой скорости вращения подвижного электрода обеспечивается горение перемежающейся (прерывистой) дуги при схождении — расхождении электродов, а также некоторое число циклов возникновения дуги [2].

Нагрузка Тугнуйского разреза — мощные ЧРП шагающих экскаваторов с электродвигателями мощностью до 3,3 МВт. Устройство преобразования частоты электропривода построено на базе силовой полупроводниковой электроники: тиристоров или транзисторов. Особенность его работы — многократные коммутации схемы под нагрузкой, что обуславливает появление нелинейных искажений в сети.

На рис. 1, а представлена осциллограмма (в двух масштабах) тока ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью, где видны затухающие высокочастотные составляющие, вносимые работой ключей частотного преобразователя привода шагающего экскаватора. Для улучшения качества напряжения в сети, питающей электроприводы, на входе каждого из них стоит мощный силовой фильтр со значительной ёмкостью.

В ходе натурных экспериментов при перемежающихся дуговых ОЗЗ была зафиксирована значительная эскалация перенапряжений. На рис. 1, б показана осциллограмма (в двух масштабах) фазных напряжений при ОДЗ, где наблюдаются значительные гармонические составляющие, обусловленные той же причиной, что и в предыдущем случае (см. рис. 1, а). Кратность перенапряжений в данном опыте составляет $(2,59 - 2,61)U_{\phi}$.

Возможности натурных экспериментов с замыканиями на землю в сетях ответственных предприятий весьма ограничены. Поэтому была поставлена задача разработать расчётные модели переходных процессов в указанных сетях. Для изучения перенапряжений в сети, питающей шагающий экскаватор, создана модель в среде Matlab/Simulink [2]. На рис. 2 приведена расчётная схема сети электроснабжения ЧРП.

Модель включает в себя эквивалентный трёхфазный генератор; эквивалентные трёхфазные ёмкости и сопротивле-