

Заземление нейтрали в кабельных сетях 6–35 кВ

СЕТИ
РОССИИ

КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ

По материалам
II Всероссийской конференции
«ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 20 кВ»

Михаил ДМИТРИЕВ, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургского политехнического университета

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее исчерпывающие исследования электромагнитных процессов в сетях среднего напряжения 6–35 кВ приведены в известной книге [1]. Ее авторы в простой и понятной форме описывают процессы при замыканиях на землю, при коммутации включения или отключения различного оборудования сети. Каждый случай снабжен расчетными осциллограммами процессов, имеет ссылки на опыт эксплуатации и на исследования других ученых. Несмотря на публикацию столь обстоятельного труда, можно только приветствовать появление новых работ, и особую ценность, конечно же, имеют натурные эксперименты.

Приведенные ниже рассуждения позволят лучше понять некоторые проблемы, имеющиеся в настоящее время в сетях 6–35 кВ.

ПОЧЕМУ СЕЙЧАС?

В сетях среднего напряжения существует большое число способов заземления нейтрали, которые так или иначе применяются в разных странах:

- изолированная нейтраль;
- заземление через реактор (компенсированная нейтраль);
- заземление через резистор;
- комбинированное заземление через реактор и резистор;
- глухое заземление нейтрали.

Выбор оптимального способа — непростой вопрос, который следует

решать с учетом многих факторов, среди которых:

- безопасность сети при возникновении повреждений;
- надежность электроснабжения потребителей;
- селективность работы релейной защиты;
- требования к изоляции оборудования относительно земли;
- требования к отключающей способности выключателей, а также к термической и динамической стойкости оборудования сети (трансформаторов, кабелей).

Важную роль при выборе способа заземления нейтрали играет и возможность создания контуров с малым сопротивлением заземления, и доминирующий в сети тип линий электропередачи (воздушные или кабельные).

Анализ всех перечисленных факторов привел к тому, что в свое время в СССР в сетях среднего напряжения 6–35 кВ было принято решение отдать предпочтение изолированной нейтрали или ее заземлению через реактор. В настоящее же время обстоятельства отчасти изменились.

По мере развития техники и технологий неизбежно происходит смена состава оборудования электрических сетей, и каждая такая «революция» вновь порождает споры о том, насколько оптимальны применяемые способы заземления нейтрали. За последние 20–30 лет

в нашей стране наиболее острое недовольство изолированной (компенсированной) нейтралью высказывалось уже дважды. Первый раз — после прихода в сети ограничителей перенапряжений нелинейных (ОПН), а второй раз — в связи с появлением однофазных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.

ОПН. Массовая установка ОПН в сети 6–35 кВ с изолированной (компенсированной) нейтралью сопровождалась их повреждениями. Нередко они происходили в режиме однофазного замыкания на землю при наличии дугowych и/или феррорезонансных перенапряжений, вызывающих многократное срабатывание ОПН за короткое время, недостаточное для остывания нелинейных элементов. До внедрения ОПН защита оборудования от грозowych (и коммутационных) перенапряжений была организована с помощью вентильных разрядников (РВ), имеющих искровой промежуток, срабатывавший только лишь от перенапряжений большой величины (грозowych в первую очередь). Это позволяло избежать токов в нелинейных элементах РВ как в нормальном режиме, так и в условиях существования дугowych и феррорезонансных процессов, обеспечивая тем самым безаварийную эксплуатацию разрядников. Когда появились ОПН, не имеющие в отличие от разрядников искровых промежутков, стало ясно, что дугowych и феррорезонансные процессы в сети уже нельзя оставлять без внимания, ими надо заниматься. Защитить и ОПН, и другое оборудование сети, изоляция которого подвергалась нежелательным воздействиям, можно было бы за счет устранения главной причины повреждений — длительного существования в сети однофазного замыкания на землю, то есть за счет оптимизации работы защит и способа заземления нейтрали. Однако проще и дешевле оказалось «латать дыры», то есть внести корректировку в методику выбора характеристик ОПН, после чего стали применять ОПН с завышенным на 10–20% наибольшим рабочим напряжением, увеличив тем самым надежность ОПН, но ухудшив защиту изоляции оборудования от грозowych (и коммутационных) перенапряжений.

Кабели. В последние годы массовая прокладка в сетях линий с однофазными кабелями обнаружила проблему наведенных в медных экранах токов и вызванных ими потерь мощности. В [2] было показано, что, как правило, эта проблема может быть решена за счет применения однофазных кабелей с малым сечением экрана и прокладкой фаз вплотную друг к другу сомкнутым треугольником. К сожалению, выбирать малое сечение экранов в сетях с изолированной (компенсированной) нейтралью никак не получается. Дело в том, что характерное для этих сетей длительное существование режима однофазного замыкания на землю нередко приводит к появлению в другом месте сети второго повреждения, образованию контура с малым сопротивлением, в котором протекает ток так называемого двойного короткого замыкания, близкий по величине току трехфазного короткого

замыкания сети и поэтому опасный с точки зрения перегрева экранов малого сечения, причем на протяженном участке трассы. Из-за этого сечение медных экранов однофазных кабелей в сетях с изолированной (компенсированной) нейтралью приходится завышать, что в нормальном режиме работы сети приводит к существенному росту наведенных токов и потерь мощности в экранах, порождает необходимость применять в сетях неудобные в эксплуатации одностороннее заземление экранов или транспозицию. Избежать внедрения данных схем удалось бы за счет исключения длительного существования режима замыкания на землю, то есть за счет оптимизации работы защит и способа заземления нейтрали.

РЕЖИМ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

ОПН и однофазные кабели — это современное оборудование с замечательными свойствами, а проблемы, которые возникают в сетях, связаны не с недостатками ОПН или кабелей, а скорее с не очень подходящей для них работой защит и не самым оптимальным способом заземления нейтрали.

Длительное существование в сети однофазного замыкания на землю зачастую связывают с тем, что потребитель, включенный на линейные напряжения сети, не чувствует возникшее в сети однофазное повреждение и продолжает нормальную работу. В таких условиях оперативное автоматизированное отключение линии, на которой выявлено замыкание, не оставит времени на подготовку потребителя к его переводу на другие источники или полному отключению. Также иногда говорят, что с отключением замыкания не следует спешить в надежде на его самоустранение.

Указанные рассуждения применимы, прежде всего, для слабо развитых систем электроснабжения, где потребитель получает питание лишь от одной линии, причем воздушной. В современных же сетях, особенно городских, линии имеют двухцепное исполнение и преимущественно кабельные. Это означает, что нет причин держать в сети однофазное замыкание, ведь если одна из линий будет отключена, потребитель вряд ли потеряет питание, также не стоит надеяться на самоустранение аварии.

Как видно, бесполезно долгое время держать в сети однофазное замыкание на землю, и, более того, наличие такого замыкания даже вредно оборудованию, ведь на изоляции неповрежденных фаз всей электрически связанной сети напряжение 50 Гц повышается с нормального фазного до линейного, а также могут возникать дугowych и феррорезонансные перенапряжения значительного уровня. Понимая, что в случае возникновения замыкания на землю целесообразно его оперативное отключение, следует признать, что в сетях с изолированной (компенсированной) нейтралью до сих пор пока нет устройств релейной защиты, позволяющих искать замыкание и отключать его с достаточной селективностью.

Да, ряд фирм рапортует о наличии у них терминалов, способных селективно выявлять место замыкания в сети с изолированной (компенсированной) нейтралью. Однако опыт эксплуатации всех подобных устройств указывает на высокий процент ошибок в поиске места аварии и неспособность полностью решать возложенные на них задачи.

Причины негативного опыта работы терминалов, по всей видимости, связаны с тем, что используемые в них алгоритмы дают сбои, если повреждение изоляции в сети имеет не устойчивый «металлический» характер, а носит дуговой характер. Так или иначе, но для оперативного поиска и отключения замыкания на землю в сети 6–35 кВ надо рассматривать другие способы, и самым известным среди них является переход от изолированной (компенсированной) нейтрали к резистивной.

Действительно в стране все больше объектов, где использовано заземление нейтрали через резистор различного сопротивления. Это и сети собственных нужд электрических станций, имеющие много кабелей 6–10 кВ, и сети генераторного напряжения, и некоторые городские кабельные сети. К сожалению, достаточно сложно сменить способ заземления нейтрали в уже эксплуатируемой сети, и такой фактор не позволяет перейти к массово-

му внедрению резисторов. Однако в новых кабельных сетях 6–35 кВ применение резисторов весьма привлекательно, и одним из примеров является сеть 20 кВ, которую построили и развивают в Москве. Появление класса 20 кВ позволило, во-первых, оптимизировать работу сети в условиях высоких плотностей нагрузок (6–10 кВ уже не справляется), а во-вторых оказалось удобным поводом внедрить резисторы, преимущества которых для однофазных кабелей уже не вызывают сомнения.

Дадим ряд пояснений относительно процессов при замыкании на землю в сети 6–35 кВ с различными способами заземления нейтрали.

ИЗОЛИРОВАННАЯ НЕЙТРАЛЬ

На рисунке 1а показаны сборные шины 6–35 кВ сети с изолированной нейтралью и, в качестве примера, две кабельные линии (КЛ) — одна из них имеет повреждение на землю фазы «А» (КЛ1), а другая является неповрежденной (КЛ2). Стрелками показаны пути, по которым проходит ток замыкания и его составляющие. Видно, что ток однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) через место повреждения уходит в землю, а далее возвращается в сеть уже через емкости «фаза-земля» фаз «В» и «С» всех кабельных линий сети, поврежденной и неповрежденных.

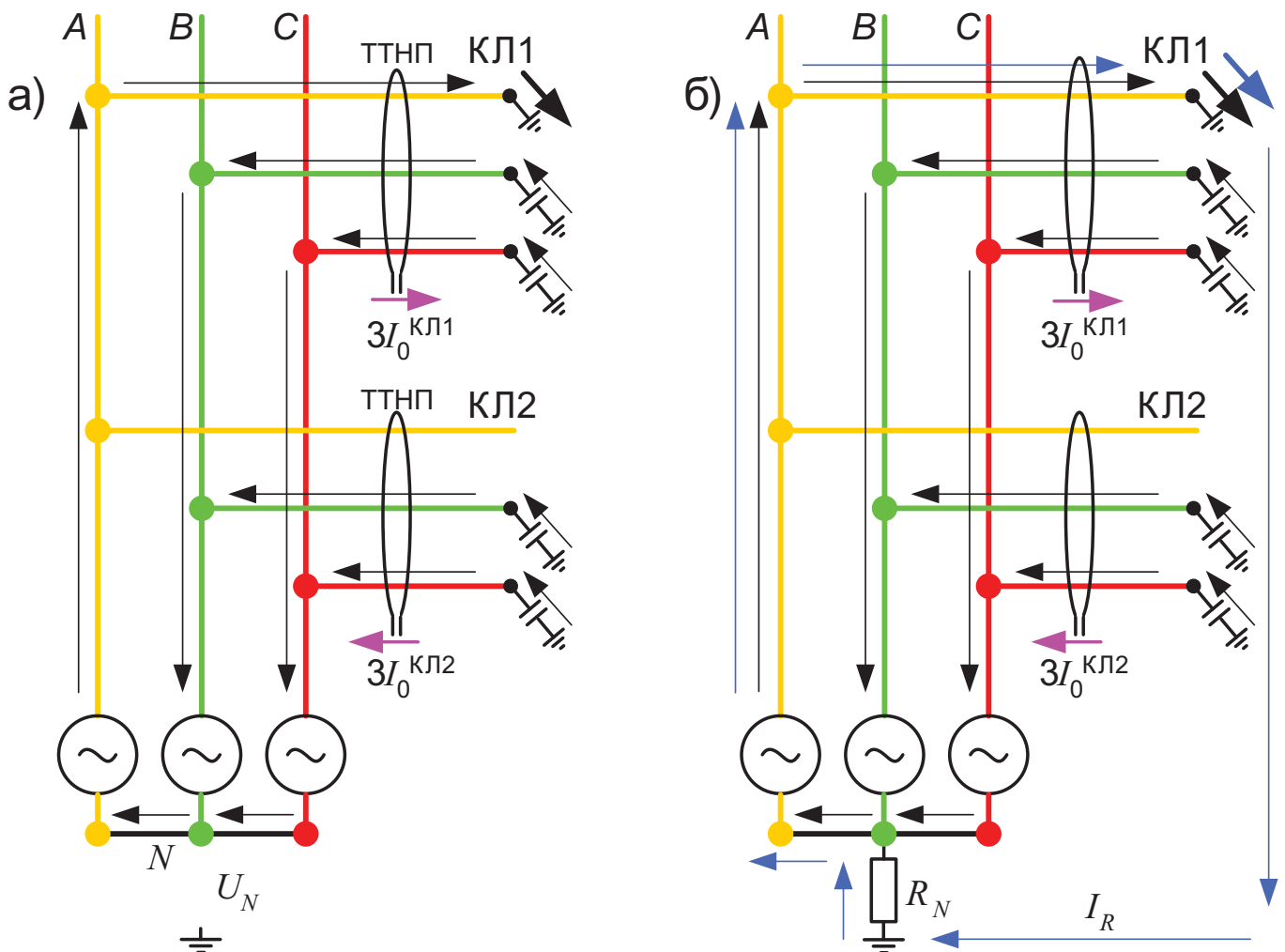


Рис. 1. Однофазное замыкание в сети 6–35 кВ: нейтраль изолирована (а), нейтраль заземлена (б)

Можно показать, что ток ОЗЗ определяется выражением

$$I_{\text{ОЗЗ}} = 3 \cdot U_{\text{Ф}} \cdot \omega \cdot C_{\text{СУМ}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \omega \cdot C_{\text{СУМ}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{Ф}}$ и $U_{\text{НОМ}}$ — фазное и линейное напряжение сети, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, $f = 50$ Гц, $C_{\text{СУМ}} = C^{\text{КЛ1}} + C^{\text{КЛ2}} + \dots$ — емкость, равная сумме емкостей «фаза-земля» всех линий, отходящих от рассматриваемых шин 6–35 кВ.

Ток замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью 6–35 кВ связан с емкостью сети и поэтому называется емкостным. Схема прохождения этого тока накладывается на рабочие токи линий, но не зависит от мощности потребителей, сохраняясь и для холостых, и для нагруженных линий. Этим объясняется тот факт, что на рисунке 1 не показаны потребители мощности, подключенные на концах КЛ.

Поскольку ток замыкания на землю, как правило, не превосходит рабочих токов линий, то для его гарантированного выявления нельзя использовать показания фазных трансформаторов тока, а следует применять трансформаторы тока нулевой последовательности (ТТНП), которые реагируют на сумму токов фаз

$$I_A + I_B + I_C = 3I_0.$$

Суммирование фазных токов позволяет исключить из рассмотрения рабочие токи линий, являющиеся токами прямой последовательности, и оставить лишь токи нулевой последовательности, которые, также как и $I_{\text{ОЗЗ}}$, носят емкостный характер. Можно показать, что, например, для схемы с 3-мя линиями измерения ТТНП будут

$$\begin{aligned} 3I_0^{\text{КЛ1}} &= I_{\text{ОЗЗ}} - I_C^{\text{КЛ1}} = I_C^{\text{КЛ2}} + I_C^{\text{КЛ3}}, \\ 3I_0^{\text{КЛ2}} &= -I_C^{\text{КЛ2}}, \\ 3I_0^{\text{КЛ3}} &= -I_C^{\text{КЛ3}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $I_C^{\text{КЛ1}}$, $I_C^{\text{КЛ2}}$, $I_C^{\text{КЛ3}}$ — собственные емкостные токи линий, определяемые через их емкости «фаза-земля»

$$\begin{aligned} I_C^{\text{КЛ1}} &= 3 \cdot U_{\text{Ф}} \cdot \omega \cdot C^{\text{КЛ1}} = 3 \cdot I_{\text{СФ}}^{\text{КЛ1}}, \\ I_C^{\text{КЛ2}} &= 3 \cdot U_{\text{Ф}} \cdot \omega \cdot C^{\text{КЛ2}} = 3 \cdot I_{\text{СФ}}^{\text{КЛ2}}, \\ I_C^{\text{КЛ3}} &= 3 \cdot U_{\text{Ф}} \cdot \omega \cdot C^{\text{КЛ3}} = 3 \cdot I_{\text{СФ}}^{\text{КЛ3}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $I_{\text{СФ}} = U_{\text{Ф}} \cdot \omega \cdot C$ — емкостный ток линии (присоединения), рассчитанный на фазу.

Погонные (на 1 км длины) значения емкости «фаза-земля» C кабельной линии и емкостного тока $I_{\text{СФ}}$ на фазу даны в каталогах кабельных заводов в зависимости от сечения жилы и класса напряжения. Зная тип и длины отходящих от шин 6–35 кВ кабелей, ток замыкания удобно вычислять как сумму емкостных токов всех линий

$$I_{\text{ОЗЗ}} = I_C^{\text{КЛ1}} + I_C^{\text{КЛ2}} + I_C^{\text{КЛ3}} + \dots \quad (4)$$

ЕМКОСТЬ КАБЕЛЕЙ И ЗАРЯДНЫЙ ТОК НА ФАЗУ

В настоящее время кабели 6–35 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена имеют однофазную или трехфазную конструкцию (с пофазно экранированными жилами). В обоих случаях каждая токоведущая жила имеет индивидуальный медный экран, а значит

у линий, построенных такими кабелями, отсутствует межфазная емкость C_M . Следовательно, емкость прямой последовательности $C_1 = C_0 + 3C_M$ и емкость нулевой последовательности C_0 равны друг другу, и становится понятно, почему кабельные заводы указывают в своих каталогах одно значение $C_1 = C_0$, называемое «рабочей емкостью кабеля».

Емкость кабеля прямо пропорциональна относительной диэлектрической проницаемости его изоляции. Поскольку у изоляции из сшитого полиэтилена $\varepsilon = 2,4$ о.е., а у бумаги, пропитанной маслом, $\varepsilon = 4,2$ о.е., то может показаться, что для современных кабелей рабочая емкость должна быть вплоть до 2-х раз меньше, чем у кабелей предыдущих поколений. Однако, если разобраться, емкость современных линий, не меньше, а даже больше!

Дело в том, что емкость зависит не только от ε , но и от сечения жилы кабеля, и от толщины его изоляции. Сейчас предельное сечение жилы трехфазного кабеля 6–35 кВ достигает 240 мм², что не сильно отличается от сечений трехфазных кабелей с бумажно-масляной изоляцией. Вместе с тем, появление и развитие однофазных кабелей дало возможность практически неограниченного роста сечения жилы, и известны линии, где оно достигает 1500–2000 мм², а это на порядок выше того, что было возможно в сетях, построенных трехфазными кабелями с бумажно-масляной изоляцией. Также у новых кабелей иные рабочие напряженности электрического поля в изоляции, а значит и другая ее толщина.

Указанные факторы приводят к тому, что больше недопустимо использовать известную со времен СССР эмпирическую формулу для тока в кабельной сети

$$I_{\text{ОЗЗ}} = (U_{\text{НОМ}} \cdot I_{\text{СУМ}}) / 10, \quad (5)$$

где $U_{\text{НОМ}}$ — номинальное напряжение сети (в кВ), $I_{\text{СУМ}}$ — суммарная длина кабельных линий (в км), $I_{\text{ОЗЗ}}$ — ток замыкания (в А).

На рисунке 2 даны результаты расчетов тока замыкания на землю по устаревшему эмпирическому выражению (5) и по точной формуле (1), куда были подставлены значения рабочих емкостей кабелей классов 10, 20, 35 кВ различного сечения жилы, заимствованные из каталога фирмы АВВ

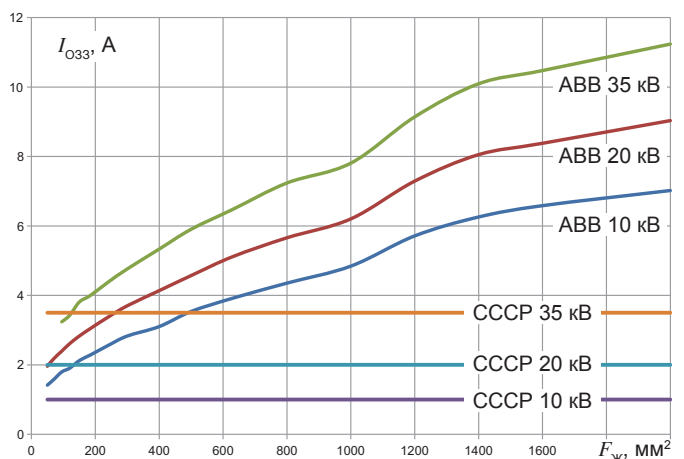


Рис. 2. Расчет тока однофазного замыкания на землю в кабельной сети протяженностью 1 км.

(наиболее грамотный каталог). Суммарная длина кабелей в сети при вычислениях по (1) и (5) принята равной $I_{\text{СУМ}} = 1$ км, также при использовании (1) полагалось, что все кабели имеют одинаковое сечение жилы — то, которое откладывается по оси абсцисс на рисунке 2.

Представленная на рисунке 2 зависимость $I_{\text{ОЗЗ}}$ от сечения жилы могла быть также получена, если из каталога взять не рабочую емкость кабеля, а приведенный там же «емкостный ток на фазу» $I_{\text{СФ}}$, который затем утроить $I_{\text{ОЗЗ}} = 3 \cdot I_{\text{СФ}}$.

Например, согласно рисунку 2 для кабельной сети 10 кВ протяженностью 1 км по старой формуле имеем ток замыкания всего 1 А, тогда как по каталогу для обычных сейчас кабелей сечением жилы 630 мм² с изоляцией из сшитого полиэтилена имеем ток замыкания 4 А. Как видно, несмотря на малую диэлектрическую проницаемость полиэтилена, емкостные токи в современных кабельных сетях 6–35 кВ могут быть в разы выше, чем были ранее. Указанный факт следует учитывать тем специалистам, кто занимается настройкой работы релейной защиты нулевой последовательности.

ПОДКЛЮЧЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Измерение фазных токов или измерение токов нулевой последовательности в ряде случаев выполняются, надевая на кабели разборные трансформаторы тока. Чтобы исключить влияние токов в экранах кабеля на результаты измерений, экраны кабеля, выведенные наружу из муфты, следует пропустить через окно трансформатора и только после этого заземлить (рисунок 3).

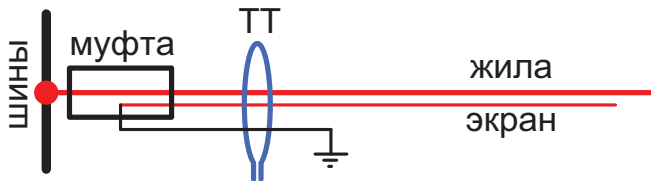


Рис. 3. Схема подключения измерительного трансформатора тока для кабеля с экраном

ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ ЧЕРЕЗ РЕЗИСТОР

В сетях, содержащих трехфазные кабели (вне зависимости от типа изоляции), повреждение одной из фаз кабеля достаточно быстро перекидывается на вторую и третью фазы, а значит можно сказать, что нет проблемы поиска места повреждения, ведь аварийная линия будет отключена обычной токовой защитой. В сетях, которые построены с применением однофазных кабелей, описанный сценарий маловероятен и даже исключен, если фазы проложены не сомкнутым треугольником, а в ряд на расстоянии друг от друга. Тогда рассмотрим методы поиска места повреждения.

Факт возникновения в сети 6–35 кВ замыкания на землю легко установить по появлению в нейтрали напряжения, соответствующего эдс аварийной фазы. Однако поиск конкретного места с нарушением изоляции затруднен, поскольку измеренные

с помощью ТТНП токи нулевой последовательности присоединений $3I_0^{\text{КЛ1}}, 3I_0^{\text{КЛ2}} \dots$ могут недостаточно отличаться друг от друга и почти всегда меньше фазных токов.

Иногда поиск места повреждения в сети 6–35 кВ с изолированной нейтралью ведут вручную, периодически отключая присоединения и контролируя напряжение в нейтрали сети. Указанный способ является нежелательным в силу многократного воздействия на изоляцию сети коммутационных перенапряжений. Очевидно, что автоматизация поиска предпочтительна, и, как правило, ее пытаются построить на сравнении величин и знаков токов $3I_0^{\text{КЛ1}}, 3I_0^{\text{КЛ2}} \dots$ всех присоединений к шинам. Есть разные методы анализа токов $3I_0$, но самых простых, наверное, всего два.

Первый способ. Из (4) видно, что при большом числе линий ток замыкания $I_{\text{ОЗЗ}}$ заметно больше емкостного тока каждой отдельной линии $I_{\text{С}}^{\text{КЛ1}}, I_{\text{С}}^{\text{КЛ2}}, I_{\text{С}}^{\text{КЛ3}}$ и др., и тогда по (2) ток нулевой последовательности аварийной линии также будет заметно больше токов нулевой последовательности всех других присоединений с исправной изоляцией.

Второй способ. Из (2) видно, что ток нулевой последовательности аварийной линии противоположен по знаку токам нулевой последовательности всех других присоединений с исправной изоляцией.

Применение тех или иных алгоритмов поиска повреждений зависит от числа линий, от соотношения их емкостных токов. Однако, к сожалению, все алгоритмы, так или иначе построенные на сопоставлении токов нулевой последовательности присоединений, не могут корректно работать, если повреждение в сети является дуговым, то есть не имеет устойчивого характера.

Кардинальное решение проблемы поиска повреждений в сетях 6–35 кВ будет после перехода от изолированной нейтрали к заземленной через резистор (рисунок 1б). Как видно, емкостная схема протекания токов не изменяется, но в аварийной линии появляется дополнительная «резистивная» составляющая $I_R = U_{\phi}/R_N$. Тогда

$$I_{\text{ОЗЗ}} = U_{\phi} \sqrt{(3 \cdot \omega \cdot C_{\text{СУМ}})^2 + (1/R_N)^2}. \quad (6)$$

Токи нулевой последовательности присоединений

$$\begin{aligned} 3I_0^{\text{КЛ1}} &= \sqrt{(I_{\text{С}}^{\text{КЛ2}} + I_{\text{С}}^{\text{КЛ3}})^2 + I_R^2}, \\ 3I_0^{\text{КЛ2}} &= -I_{\text{С}}^{\text{КЛ2}}, \\ 3I_0^{\text{КЛ3}} &= -I_{\text{С}}^{\text{КЛ3}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Поиск места замыкания теперь уже не получится построить за счет сравнения знаков токов нулевой последовательности, поскольку векторы токов $3I_0$ аварийной и неповрежденных линий уже нельзя считать направленными в противоположные стороны. Зато, удачно выбрав R_N , защита будет селективно работать только лишь за счет простого сравнения величин $3I_0$, ведь теперь ток поврежденной линии заметно больше токов неповрежденных. Опыт показывает, что резистор, обеспечивающий ток $I_R > 500$ А, решает проблему селективного поиска места замыкания на землю.

Например, для сети 20 кВ, имеющей в нейтрали резистор 12 Ом, активный ток в месте замыкания составит $I_R = U_\phi / R_N = 960$ А, а полный ток I_{O33} замыкания на землю следует вычислить по (6) с учетом его емкостной составляющей.

Резистор может иметь постоянное подключение к нейтрали, и тогда защиты должны быть настроены на отключение линии, а значит и ее нагрузки. Однако есть возможность устанавливать резистор через нормально разомкнутый выключатель, подключаемый лишь на короткое время с целью выявления места замыкания, и тогда защиты можно настраивать не на отключение линии с нагрузкой, а на сигнал.

ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ ЧЕРЕЗ РЕАКТОР

Согласно ПУЭ в сетях 6, 10, 35 кВ с изолированной нейтралью, если токи замыкания на землю I_{O33} превосходят соответственно 30 А, 20 А, 10 А, требуется установка в нейтрали специального реактора. Емкостная схема, как и для случая с резистором, не изменяется, но в линии с повреждением появляется дополнительная «индуктивная» составляющая тока $I_L = U_\phi / (\omega L_N)$. Векторы емкостной и индуктивной составляющих направлены в противоположные стороны, поэтому

$$I_{O33} = U_\phi \cdot (3 \cdot \omega \cdot C_{CYM} - 1 / (\omega L_N)). \quad (8)$$

Подбором индуктивности реактора L_N можно добиться минимальных величин токов $I_{O33} \approx 0$. Однако достичь $I_{O33} = 0$ не представляется возможным из-за наличия активного сопротивления у реактора, у линий, у земли.

Для вычисления токов $3I_0$ линий можно использовать (2), куда подставлять ток I_{O33} , определяемый по (8). Установка реактора в нейтраль затрудняет построение алгоритмов защит от замыканий на землю, поскольку при $I_{O33} \approx 0$ согласно (2) токи $3I_0$ присоединений будут, во-первых, мало отличаться друг от друга по величине (если длины линий близки друг другу), а во-вторых, будут одного знака.

С годами неуклонно растет число сетей 6–35 кВ, которые изначально должны были работать с компенсированной нейтралью, но по факту реакторов не имеют. Отчасти это связано с высокой стоимостью реакторов и не вполне отработанными алгоритмами их настройки в резонанс с емкостью сети. Другой причиной стало то, что в кабельных сетях длительная работа с замыканием на землю не имеет особого смысла и даже вредна. Не имеет смысла, поскольку повреждение никогда само не устранится (даже при идеальной компенсации до уровня $I_{O33} \approx 0$), и вредна потому, что сложно наладить поиск повреждений на основе измерений токов $3I_0$, а тогда искать приходится вручную, подвергая сеть многочисленным коммутациям.

В последние годы обратили внимание и на еще одно обстоятельство, которое больше не позволяет считать применение реакторов эффективным. Дело в том, что в сетях растет доля преобразова-

тельной техники, а значит кривые токов и напряжений получают все больше высших гармонических составляющих. В таких условиях даже если реактор настроен на полную компенсацию емкостного тока 50 Гц замыкания на землю, в месте повреждения продолжает проходить ничем не скомпенсированный ток высших гармоник (например, 3-й), способный достигать десятков А, что по ПУЭ нельзя считать допустимым.

ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

В [1] показано, что в зависимости от состояния нейтрали сети меняются не только токи замыкания на землю, но и величина и форма перенапряжений, которые возникают при неустойчивом горении дуги или при феррорезонансных явлениях. В случае резистивного заземления нейтрали перенапряжения заметно менее опасны, чем при изолированной (компенсированной) нейтрали.

Если говорить о включениях и отключениях присоединенных к шинам линий, то есть о коммутационных перенапряжениях, то они не зависят от состояния нейтрали сети, а определяются характеристиками выключателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специалистам, занимающимся проектированием кабельных сетей 6–35 кВ, наладкой защит и дальнейшей их эксплуатацией, следует обратить внимание на ряд важных особенностей, присущих современным сетям.

1. У кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена рабочая емкость «фаза-земля» больше, чем у кабелей с бумажно-масляной изоляцией.
2. В сетях, построенных однофазными или трехфазными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена, имеющими медные экраны, подключение измерительных трансформаторов тока всегда должно обеспечивать отсутствие влияния токов в экранах на результаты измерений.
3. Массовое применение однофазных кабелей целесообразно проводить лишь в тех сетях, где обеспечено быстрое выявление и отключение однофазного замыкания на землю — как правило, для достижения этого приходится заземлять нейтраль сети через низкоомный резистор.
4. В сетях, где возможна длительная работа с однофазным замыканием на землю, рекомендуется ограничить использование однофазных кабелей, применяя вместо них трехфазные кабели или с изоляцией из сшитого полиэтилена, или с бумажно-масляной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Евдокунин Г.А., Титенков С.С. Внутренние перенапряжения в сетях 6–35 кВ // Издательство Терция, 2004. 188 с.
2. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 152 с.