

4. *ГОСТ 1516.3*. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 550 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.
5. *Кулаковский В. Б.* Работа изоляции в генераторах. М.: Энергия, 1981.
6. *Slamecka E.* Interruption of Small inductive currents. Charter 3. Part B. – *Elektra*, 1984, № 95.
7. *Стандарт МЭК IEC 34-15*. Импульсные выдерживаемые уровни вращающихся машин с шаблонными статорными обмотками, 1990.
8. *Каталог* фирмы ABB High Technologies Ltd.

Резистивное заземление нейтрали в сети собственных нужд Энгельсской ТЭЦ-3 Саратовэнерго

Софинский А. В., Кучеренко В. И., Хуртов И. И., Багаев Д. В., Ильиных М. В., Сарин Л. И., инженеры

ОАО Саратовэнерго – ПНП “БОЛИД” (г. Новосибирск)

Сети 6 – 10 – 35 кВ, эксплуатируемые в России, традиционно имеют изолированную нейтраль или нейтраль, заземленную через дугогасящий реактор (ДГР). Однако в последние годы широко развернулась дискуссия о заземлении нейтрали в этих сетях через резисторы различного сопротивления.

Опыт эксплуатации сетей 6 – 10 – 35 кВ за многие годы показал, что нарушения нормальной работы этих сетей связаны в основном с однофазными замыканиями на землю (ОЗЗ) и феррорезонансными явлениями (в сетях с малыми емкостными токами замыкания на землю).

Рассмотрим кратко основные достоинства сетей с изолированной нейтралью и нейтралью, заземленной через ДГР.

Основным достоинством сетей с изолированной нейтралью считается то, что в режиме ОЗЗ эти сети могут работать определенное время без отключения, сохраняя тем самым бесперебойность энергоснабжения.

При больших значениях емкостных токов на землю ухудшаются условия самопогасания дуги в месте замыкания, а кроме этого, протекание больших токов в месте дугового замыкания приводит к повреждению оборудования и увеличению нанесенного ущерба.

Компенсация емкостных токов однофазного замыкания на землю путем использования дугогасящего реактора при правильной его настройке позволяет обеспечить работу с ОЗЗ в течение длительного времени без перехода в междуфазное замыкание, что является одним из основных достоинств подобных сетей. Но, как показывает практика, у таких сетей есть ряд недостатков:

точное ведение режима компенсации емкостного тока возможно лишь при применении плавнорегулируемых ДГР с автоматической настройкой компенсации;

несовершенство имеющихся регуляторов автоматической настройки ДГР, работающих на “фазовом” принципе, ограничивает применение автоматики в сетях с нестабильным вектором несимметрии;

необходимость симметрирования воздушных и кабельно-воздушных сетей, требующая больших трудозатрат;

необходимость установки специального оборудования для определения дефектного присоединения. Существующие методы отыскания места повреждения путем поочередного отключения фидеров вносят в сеть раскомпенсацию, и тем самым способствуют переходу ОЗЗ в междуфазные замыкания.

Кроме того, есть общий серьезный недостаток, характерный для сетей с изолированной нейтралью и сети с нейтралью, заземленной через ДГР: уровни перенапряжений при однофазных замыканиях на землю, особенно при дуговых (ОДЗ), превышают уровень электрической прочности изоляции некоторых видов электрического оборудования, например, вращающихся машин.

Одним из способов повышения надежности эксплуатации сетей 6 – 10 – 35 кВ является применение резистивного заземления нейтрали.

При резистивном заземлении нейтрали ограничение перенапряжений при дуговых замыканиях осуществляется за счет разряда емкости здоровых фаз и снижения напряжения на нейтрали до значения, исключающего эскалацию перенапряжений при последующих пробоях ослабленной изоляции аварийной фазы. Кроме того, практически исключаются опасные феррорезонансные явления, что, в свою очередь, также приводит к повышению надежности рассматриваемых сетей.

Теоретические исследования и опыт эксплуатации [1 – 3] показывают, что уменьшить значение дуговых перенапряжений и число замыканий на

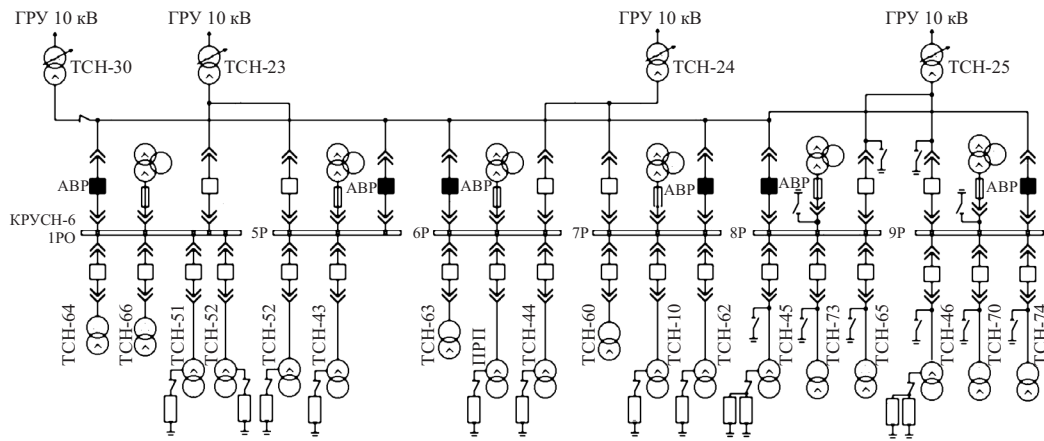


Рис. 1. Схема сетей 6 кВ с.н. Энгельсской ТЭЦ-3

землю без значительного искусственного увеличения тока замыкания на землю можно за счет включения в нейтраль сети высокоомного резистора сопротивлением от нескольких сотен ом до нескольких килоом.

Высокоомный резистор с сопротивлением R_N в нейтрали сети (как правило, в нейтрали специального вспомогательного трансформатора) обеспечивает стекание заряда за время, равное полупериоду промышленной частоты ($T = 0,01$ с).

Включение резистора в нейтраль сети позволяет получить в месте повреждения активную составляющую тока, примерно равную емкостной,

$$I_{RN} \approx I_c.$$

При этом суммарный ток замыкания на землю возрастает в $\sqrt{2}$ раз.

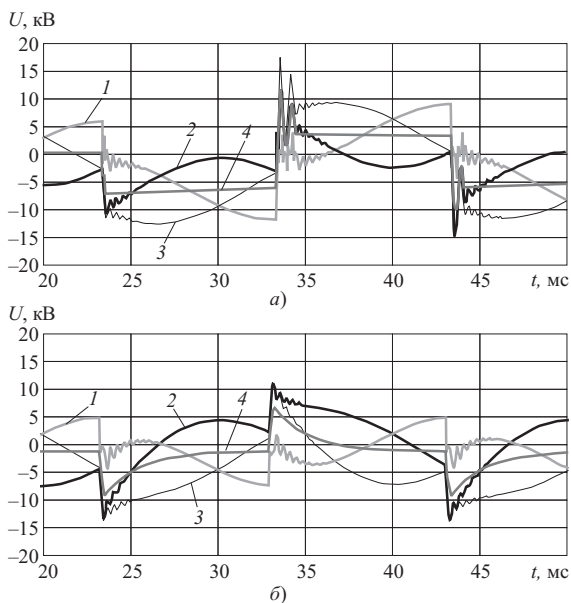


Рис. 2. Расчетные осциллограммы при ОДЗ в сети 6 кВ секции 7P, $I_c = 2,5$ А:

а – изолированная нейтраль; б – нейтраль заземлена через резистор $R = 850$ Ом; 1 – U_a ; 2 – U_b ; 3 – U_c ; 4 – U_n

Емкостная составляющая тока замыкания на землю

$$I_c = 3\omega CU_\phi,$$

где ω – круговая частота, равная $2\pi f$; C – фазная емкость сети на землю; U_ϕ – фазное напряжение сети.

Активная составляющая тока замыкания на землю

$$I_{RN} = U_\phi/R_N,$$

где R_N – сопротивление резистора.

$$U_\phi/R_N = 3\omega CU_\phi;$$

$$R_N \approx 1/(900C).$$

Однако, как показывает практика, выбор резистора для конкретной сети производится индивидуально. При этом в одних случаях по условию ограничения кратности дуговых перенапряжений до уровня $(2,6 - 2,7)U_\phi$ активная составляющая тока замыкания на землю может быть в 1,5 – 2 раза меньше емкостной составляющей. В других случаях для повышения селективности работы токовой защиты от замыкания на землю активная составляющая тока замыкания на землю может несколько превысить емкостную составляющую.

Резистивное заземление в сети 6 кВ собственных нужд Энгельсской ТЭЦ-3. Структура сети 6 кВ собственных нужд (с.н.) Энгельсской ТЭЦ-3 ОАО Саратовэнерго, работавшей до октября 2000 г. с изолированной нейтралью, с множеством единиц высоковольтного оборудования (рис. 1) способствует возникновению однофазных замыканий на землю, преимущественно дуговых.

Возникновение в сети дуговых замыканий приводит к появлению опасных перенапряжений; как показали расчеты, а позже и проведенные измерения – до $3,0U_\phi$ (характерные расчетные осциллограммы при ОДЗ в сети с.н. 6 кВ на секции 7P показаны для примера на рис. 2).

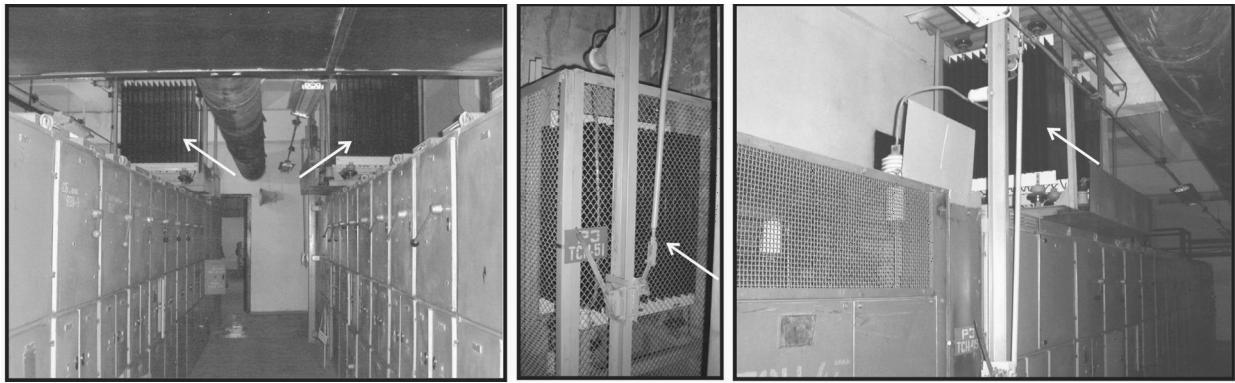


Рис. 3. Размещение резисторов P3-1700-10-6 в КРУСН 6 кВ

В условиях снижения электрической прочности изоляции кабелей, оборудования распределительных устройств, электрических двигателей такой уровень перенапряжений в ряде случаев может приводить к одновременному выходу из строя нескольких электродвигателей одновременно и повреждению изоляции распределительных устройств во многих местах, что неоднократно наблюдалось в сети с.н. Энгельсской ТЭЦ-3.

Для исключения таких аварий в 1999 г. на техническом совете ОАО Саратовэнерго было принято решение о целесообразности применения высокоомного резисторного заземления нейтрали сети с.н. 6 кВ Энгельсской ТЭЦ-3. Данное решение соответствовало вышедшему к тому времени ПТЭ-15, в п.5.11.8 которого появилась запись: “В сети собственных нужд 6 кВ блочных электростанций допускается режим работы с заземлением нейтрали сети через резистор”.

С целью определения кратности возможных перенапряжений при ОДЗ и сопротивления резисторов был выполнен комплекс расчетов для режима изолированной и резистивно-заземленной нейтрали рассматриваемой сети с.н. 6 кВ с использованием программы “МАЭС”.

Емкостный ток замыкания на землю (исходя из емкостей кабельных линий и установленного оборудования) для сети 6 кВ с.н. Энгельсской ТЭЦ-3 в нормальном режиме работы сети имеет следующие величины: секция 1Р0 + 5Р $I_c = 5,68$ А, секция 6Р + 7Р $I_c = 5,45$ А, секции 8Р + 9Р $I_c = 4,0$ А.

На основании предварительного анализа схемы и расчетов было предложено для защиты сети 6 кВ с.н. в условиях ОДЗ и улучшения работы токовой защиты от замыкания на землю установить на каждой секции шин в нейтрали трансформаторов с.н. 6/0,4 кВ два резистора (по одному в нейтраль каждого трансформатора со стороны 6 кВ) сопротивлением $R = 1,7$ кОм. Уровень перенапряжений при ОДЗ по предварительным расчетным данным не должен был превышать $2,5U_{\phi}$.

Два резистора на каждой секции, подключенные к нейтрали разных трансформаторов, обеспечивают более высокую гибкость схемы и при этом

сохраняется необходимый уровень ограничения перенапряжений при ОДЗ.

Таким образом, на каждой из двоярных секций шин имеется возможность включать как по два резистора с $R_{\Sigma} = 0,85$ кОм, так и все четыре резистора с $R_{\Sigma} = 0,425$ кОм (рис. 1).

На основе проведенных расчетов были разработаны технические требования и изготовлены резисторы номиналом 1700 Ом, напряжением 6 кВ (типа P3-1700-10-6). Характеристика резисторов приведена в табл. 1.

Резисторы были смонтированы в свободных местах КРУСН 6 кВ (рис. 3, резисторы обозначены стрелками) в течение 2000 г. и в октябре 2000 г. введены в эксплуатацию.

Подключались резисторы к нейтралям ТСН с помощью разъединителей.

Измерение уровней перенапряжений при создании искусственного однофазного дугового замыкания на землю и оценка эффективности ограничения дуговых перенапряжений в сети 6 кВ с.н. ТЭЦ-3. В 2002 г. были проведены натурные испытания и измерения в сети 6 кВ с.н. силами ПНП “БОЛИД” и специалистами ОАО Саратовэнерго. Для измерения перенапряжений при искусственном ОДЗ, согласно утвержденной про-

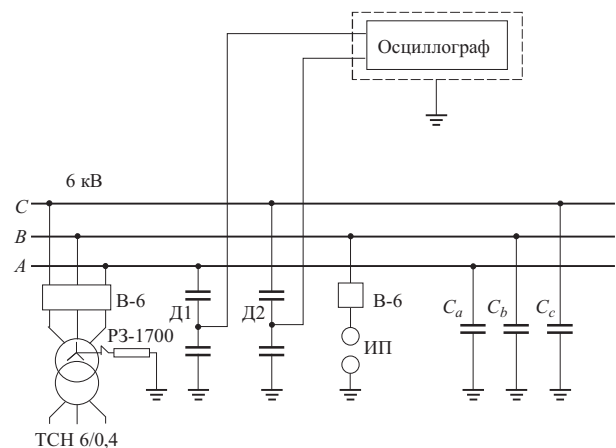


Рис. 4. Схема подключения измерительной аппаратуры и искрового промежутка

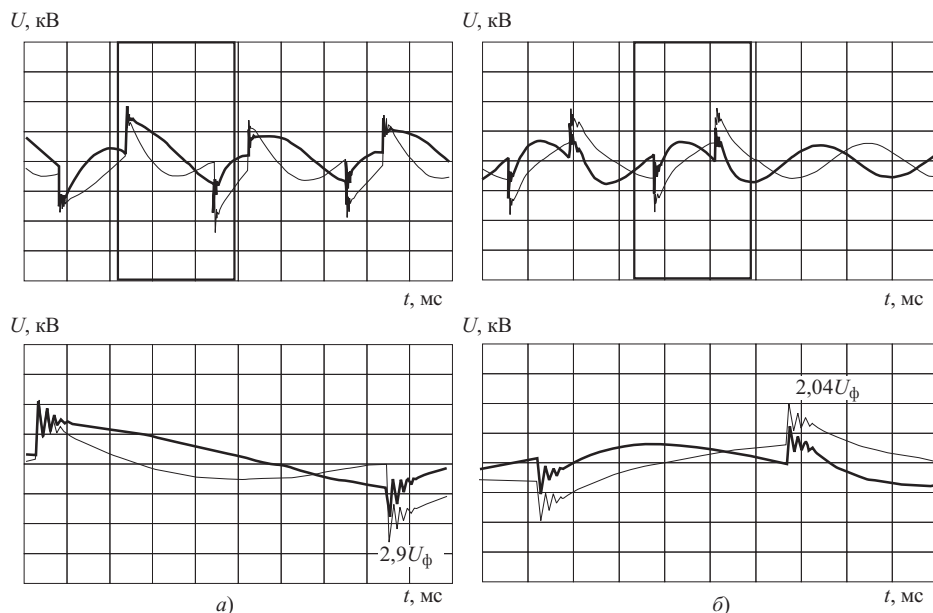


Рис. 5. Осциллограммы напряжений двух здоровых фаз при дуговых замыканиях:

а – изолированная нейтраль $U_M = 2,9U_\phi$; *б* – нейтраль заземлена через два резистора РЗ-1700-10-6 $U_M = 2,04U_\phi$

грамме испытаний, была выделена секция 7Р, которая питалась от отдельного трансформатора (ТСН-24). Измерение перенапряжений на секции 7Р проводилось при различных режимах заземления нейтрали: изолированная нейтраль; нейтраль, заземленная через один резистор; нейтраль, заземленная через два резистора (табл. 2).

Измеренный емкостный ток замыкания на землю секции 7Р составил 2,53 А.

К шинам с.н. 6 кВ секции 7Р подключалась измерительная аппаратура (емкостные делители напряжения, цифровой измерительный осциллограф) и специальный искровой промежуток (ИП) для создания ОДЗ. Схема подключения изображена на рис. 4.

Емкостные делители напряжения Д1 и Д2 типа ДНЕ 1-4 имеют диапазон измеряемых напряжений 3 – 100 кВ, погрешность измерения напряжения в диапазоне частот 50 – 2000 Гц не более $\pm 8\%$, в диапазоне частот от 2 кГц до 2 МГц – $\pm 3\%$. Искусственное дуговое замыкание на землю создавалось с помощью специального искрового проме-

жутка (ИП), устанавливаемого в фазу В, с регулируемым зазором между электродами.

В связи с тем, что при испытаниях использовался двухканальный осциллограф, одновременно возможно было регистрировать напряжения только в двух фазах. Для регистрации максимальных перенапряжений при дуговых замыканиях делители напряжения устанавливались в фазах А и С, т.е. перенапряжения измерялись на “здоровых” фазах А и С. Зазор искрового промежутка выбирался таким образом, чтобы пробой промежутка происходил вблизи максимума фазного напряжения.

Измерительный осциллограф – двухканальный цифровой запоминающий осциллограф (ЦЗО) типа АСК-3151, заводской номер 1600492, связанный с ПЭВМ. Осциллограф имеет два независимых канала (каждый канал АСК-3151 имеет собственный АЦП) с чувствительностью от 10 мВ/дел до 5 В/дел. Полоса пропускания при используемых коэффициентах отклонения – 70 МГц. Погрешность при регистрации входных сигналов не более $\pm 5\%$.

В ходе эксперимента зафиксированы процессы с повторными пробоями промежутка и погасанием дуги, подобными дуговому замыканию с перемежающейся дугой.

Кратность перенапряжений при ОДЗ для сети 6 кВ определялась по формуле

$$K_{\Pi} = U_M / U_\phi,$$

где U_M – максимальное значение напряжения в переходном процессе; U_ϕ – амплитуда рабочего фазного напряжения (на момент проведения измерений $U_{\text{л}} = 6,0$ кВ, $U_\phi = 4,9$ кВ амплитудное значение).

Т а б л и ц а 1

| Параметр | Значение |
|---|-------------------------------|
| Номинальное напряжение сети, кВ | 6 |
| Наибольшее рабочее напряжение сети, кВ | 6,6 |
| Номинальное напряжение резистора, кВ | 3,5 |
| Номинальное сопротивление резистора, Ом | $1700 \pm 10\%$ |
| Номинальная мощность резистора, кВт | 10 |
| Масса, кг | 410 |
| Габаритные размеры, мм | $1290 \times 750 \times 1820$ |

Т а б л и ц а 2

| Режим нейтрали сети 6 кВ с.н. секции 7Р при проведении эксперимента | Максимальное значение перенапряжений, зарегистрированных при ОДЗ (амплитудное значение), кВ | Кратность перенапряжений, зарегистрированных при ОДЗ, отн.ед. | Кратность максимальных перенапряжений по расчетам переходных процессов на ПЭВМ, отн.ед. |
|--|---|---|---|
| Изолированная | 14,37 | 2,9 | 2,9 – 3,0 |
| Заземлена через 1 резистор РЗ-1700-10-6 $R_{\Sigma} = 1,7$ кОм, подключенный к ТСН-10 | 11,25 | 2,3 | 2,18 – 2,3 |
| Заземлена через 1 резистор РЗ-1700-10-6 $R_{\Sigma} = 1,7$ кОм, подключенный к ТСН-62 | 10,62 | 2,17 | 2,18 – 2,3 |
| Заземлена через 2 резистора РЗ-1700-10-6 $R_{\Sigma} = 0,85$ кОм, подключенные к ТСН-10 и к ТСН-62 | 10,0 | 2,04 | 2,1 – 2,2 |

Примечание. После проведения измерений (апрель 2002 г.) и получения результатов измерений в сети 6 кВ с.н. были введены в работу все резисторы (на каждой из двояных секций шин были включены по два резистора с $R_{\Sigma 2} = 0,85$ кОм, т.е. $R_{\Sigma 4} = 0,425$ кОм).

Максимальные зарегистрированные перенапряжения и кратности перенапряжений при различных способах заземления нейтрали секции 7Р приведены в табл. 2. Характерные экспериментальные осциллограммы перенапряжений при ОДЗ в двух здоровых фазах показаны на рис. 5.

Выводы

1. В результате проведения измерений перенапряжений при искусственных дуговых замыканиях на землю в сети 6 кВ с.н. КРУСН-6 секции 7Р Энгельсской ТЭЦ-3 ОАО Саратовэнерго с емкостным током замыкания на землю 2,53 А зарегистрированы перенапряжения:

кратностью 2,9 при изолированной нейтрали сети;

кратностью 2,17 – 2,3 при заземлении нейтрали через один резистор номиналом 1,7 кОм;

кратностью 2,04 при заземлении нейтрали через два параллельно включенных резистора номиналом 1,7 кОм ($R_{\Sigma} = 0,85$ кОм).

2. Результаты измерений перенапряжений и моделирования на ПЭВМ переходных процессов при ОДЗ практически совпадают, что позволяет утверждать о правильности методических подходов при определении номинала активного сопротивления для заземления нейтрали сети 6 кВ собственных нужд Энгельсской ТЭЦ-3 ОАО Саратовэнерго.

3. Проведенные измерения подтвердили, что применение высокоомного резистивного заземления позволяет эффективно ограничивать перенапряжения при ОДЗ до уровня, безопасного для

изоляции электрических машин и другого оборудования.

4. Применение резисторов в сети с.н. позволяет значительно облегчить работу ограничителей перенапряжений, которые устанавливаются на секциях шин для защиты от коммутационных перенапряжений.

5. Применение резистивного заземления нейтрали сети 6 кВ с.н. Энгельсской ТЭЦ-3 ОАО Саратовэнерго в 2000 г. позволило энергосистеме экономить средства на приобретение дорогостоящих высоковольтных электродвигателей. По статистике до установки резисторов в сети с.н. 6 кВ КРУСН-6 повреждалось два – четыре высоковольтных двигателя в год. После установки резисторов в 2001 – 2002 гг. повреждений дорогостоящих высоковольтных двигателей 6 кВ во время ОДЗ не происходило.

6. После установки резисторов в сети 6 кВ с.н. появилась реальная возможность сделать простую и селективную защиту от замыканий на землю на базе трансформаторов тока нулевой последовательности и реле РТЗ-51, позволяющую определять по активному току дефектные присоединения. Такая защита может работать как на отключение, так и на сигнал в зависимости от технологического процесса.

Список литературы

1. *Защита сетей 6 – 35 кВ от перенапряжений* / Халилов Ф. Х., Евдокунин Г. А., Поляков В. С. и др. СПб.: ПЭИПК, 1997.
2. *Евдокунин Г. А., Гудилин С. В., Корепанов А. А.* Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6 – 10 кВ. – *Электричество*, 1998, № 12.
3. *Кадамская К. П.* Защита от перенапряжений в сетях различного назначения. Новосибирск: НГТУ, 2001.