

ОГРАНИЧЕНИЕ ДУГОВЫХ И ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

Ю.П. Симаков – канд. техн. наук,

В.А. Мезгин – канд. техн. наук,

А.Н. Валькевич – аспирант, инженер

Проведены теоретические и экспериментальные исследования дуговых и феррорезонансных перенапряжений при однофазных замыканиях на землю в электрических сетях 6–35 кВ, рассмотрены способы ограничения дуговых и феррорезонансных перенапряжений.

Ключевые слова: дуговые перенапряжения; феррорезонансные перенапряжения; режим нейтрали; дугогасящая катушка; резистор.

В электрических сетях 6–35 кВ с изолированной и компенсированной нейтралью замыкания на землю приводят к возникновению перенапряжений, которые являются причиной большинства повреждений, особенно в кабельных сетях. Характер повреждения в сети зависит от состояния изоляции элементов сети и кратности перенапряжений, т.е. отношения максимального значения перенапряжения к максимальному значению фазного напряжения сети.

В сетях с изолированной нейтралью имеют место дуговые однофазные замыкания на землю. Аварийный процесс при этом характеризуется рядом следующих друг за другом повторных зажигания и гашений электрической дуги. Гашение и зажигание перемежающейся дуги вызывает сложные переходные процессы.

Включение в нейтраль высокоомного активного сопротивления существенно снижает возможные перенапряжения на неповрежденных фазах при возникновении однофазных замыканий на землю. Это достигается за счёт того, что

за время каждой бестоковой паузы, накопленные на фазовых емкостях сети статические заряды успевают разрядиться через сопротивление резистора в нейтрали, т.е. стекают в землю. При этом напряжение нейтрали, накладываемое на фазные напряжения, стремится к нулю, что снижает уровни возможных перенапряжений [1]. Статья посвящена оценке эффективности ограничения перенапряжений путем заземления нейтрали через активное сопротивление.

Дуговые перенапряжения при однофазном замыкании на землю

Анализ переходных процессов при однофазных замыканиях на землю в сетях с различными способами заземления нейтрали (с изолированной нейтралью, с нейтралью, заземленной через дугогасящую катушку, с нейтралью, заземленной через активное сопротивление, нейтралью, заземленной одновременно через активное сопротивление и дугогасящую катушку) показал, что первое зажигание дуги во всех этих случаях происходит одинаково, т.е. сопровождается

колебательным процессом, частота и амплитуда которого практически не зависят от способа заземления нейтрали. Уровень перенапряжений при этом практически одинаков во всех случаях. После гашения дуги характер восстановления напряжения на поврежденной фазе различен для всех видов режима нейтрали, что приводит к различному характеру изменения напряжения на неповрежденных фазах и различному уровню перенапряжений, возникающих на этих фазах.

В сети с изолированной нейтралью выражение для восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе после гашения дуги имеет вид:

$$U_A(t) = e_A(t) + U_0 e^{p(t-t_1)} - (U_\phi + U_0) e^{-\beta_0(t-t_1)} \cos \omega_2(t-t_1),$$

где $e_A(t)$ – ЭДС источника питания;
 U_0 – напряжение смещения нейтрали;

$$p = -\frac{1}{R_{из}C};$$

$R_{из}$ – активное сопротивление изоляции фазы по отношению к земле;

C – емкость фазы по отношению к земле;

U_ϕ – фазное напряжение сети;

$$\beta_0 - \text{декремент затухания, } \beta_0 = \frac{R}{2L};$$

R – активное сопротивление фазы сети;

L – индуктивное сопротивление фазы сети;

t_1 – момент времени погасания дуги (момент прохождения высокочастотного тока замыкания на землю через ноль);

ω_2 – частота свободных колебаний переходного процесса, $\omega_2 = \sqrt{\omega_{02}^2 - \beta_0^2}$;

$$\omega_{02} = \frac{1}{\sqrt{L(C + 3C_M)}};$$

C_M – межфазная емкость сети.

После гашения дуги напряжение на поврежденной фазе складывается из напряжения источника питания $e_A(t)$, напряжения смещения нейтрали $U_0 e^{p(t-t_1)}$ и напряжения высокочастотных колебаний $(U_\phi + U_0) e^{-\beta_0(t-t_1)} \cos \omega_2(t-t_1)$. Эти высокочастотные колебания приводят к характерному всплеску напряжения на поврежденной фазе, носящему название пика гашения $U_{п.г}$. Амплитуда колебаний равна разности между мгновенным значением вынужденного напряжения на поврежденной фазе непосредственно после обрыва дуги $e_A(t) + U_0$ и начального напряже-

ния до обрыва дуги, равного нулю. Пик гашения приближенно равен (без учета затухания и изменения во времени напряжения промышленной частоты):

$$U_{п.г} \approx 2[e_A(t) + U_0].$$

Если не происходит повторного зажигания дуги, то после затухания свободных колебаний происходит медленное снижение напряжения смещения на фазах линии с частотой, равной частоте источника.

Рассматривая вариант поведения дуги и определяя предельные величины перенапряжений, когда дуга гаснет при первом переходе через нуль тока высокочастотных колебаний и вновь зажигается через полпериода в момент максимума напряжения на поврежденной фазе (теория Петерсена), получаем максимальную кратность перенапряжений $U_{н.макс} = 4,26U_\phi$ [2].

Многочисленные исследования в энергосистемах показали, что перенапряжения $(3-3,2)U_\phi$ являются предельными при дуговых замыканиях на землю.

В сети с компенсированной нейтралью выражение для восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе после гашения дуги имеет вид:

$$U_A(t) = e_A(t) + U_0 e^{-\beta_2(t-t_1)} \cos \omega'_{0K}(t-t_1) - (U_\phi + U_0) e^{-\beta_0(t-t_1)} \cos \omega_2(t-t_1),$$

$$\text{где } \beta_2 = \frac{R_0}{2L_0} + \frac{G}{2C} - \text{декремент затухания};$$

G – проводимость изоляции сети;

$R_0 = R_K + \frac{R}{3}$ – активное сопротивление нулевой последовательности (сопротивление катушки и линии);

$$\omega'_{0K} = \sqrt{\omega_{0K}^2 - \beta_2} \approx \omega_{0K},$$

$$\omega_{0K} = \frac{1}{\sqrt{3L_0C}} \approx \frac{1}{\sqrt{3L'_K C}} - \text{собственная частота сети с катушкой};$$

$L_0 = L_K + \frac{L}{3}$ – индуктивность нулевой последовательности (индуктивность катушки и линии).

После затухания высокочастотной составляющей на емкостях трех фаз на нейтрали устанавливается общее напряжение смещения U_0 . Одинаково заряженные емкости начинают разряжаться через катушку с частотой, равной при идеальной настройке частоте источника ω . При наложении этих низкочастотных колебаний на напряжение

источника получается медленное нарастание напряжения на дуговом промежутке, обусловленное затуханием свободных колебаний.

Защитное действие дугогасящей катушки особенно эффективно проявляется при настройке в резонанс. При этом остаточный ток в месте перекрытия оказывается минимальным, восстанавливающееся спустя 0,1 с после погасания дуги, напряжение на аварийной фазе не превышает 30% от $U_{\phi m}$, а спустя 0,4 с (20 периодов промышленной частоты) – напряжение на поврежденной фазе достигает $U_{\phi m}$.

В реальных сетях в момент возникновения дуги зачастую не удается обеспечить достаточную степень компенсации емкостного тока и идеальную симметрию. В связи с этим, в сетях с дугогасящим реактором со ступенчатым регулированием индуктивности, кратность дуговых перенапряжений оказывается лишь незначительно ниже, чем в сетях с изолированной нейтралью.

В сетях с нейтралью, заземленной через резистор, выражение для восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе после гашения дуги имеет вид:

$$U_A(t) = e_A(t) + e^{-\beta_2(t-t_1)} \left[\frac{\beta_2}{a} (U_\phi + 2U_0) \sin a(t-t_1) - U_\phi \cos a(t-t_1) \right] - (U_\phi + U_0) e^{-\beta_0(t-t_1)} \cos \omega_2(t-t_1),$$

здесь $\beta_2 \approx \frac{3R_3}{2L}$ – декремент затухания низкочастотных колебаний; R_3 – активное сопротивление заземляющего нейтрали резистора; $a = \sqrt{\beta_2^2 - \omega_0^2}$.

В данном случае первичное замыкание, сопровождающееся перенапряжением кратности 2,2–2,5, будет единственным, так как при наличии резистора обеспечивается практически полное стекание заряда нулевой последовательности (равенство нулю напряжения на нейтрали) за время от момента самогашения дуги до момента возникновения максимального напряжения на поврежденной фазе, которое становится близким к фазному. Даже в том случае, когда пробивное напряжение ослабленного места станет меньше амплитудного фазного напряжения, и может установиться процесс многократных зажигания и гашений дуги, кратность дуговых перенапряжений не превысит 2,2–2,5.

В сети с нейтралью, заземленной через дугогасящую катушку и высокоомный резистор,

восстанавливающееся напряжение на поврежденной фазе после гашения дуги имеет вид:

$$U_A(t) = e_A(t) + e^{-\beta_2(t-t_1)} U_0 \sin \left[\omega'_{0K}(t-t_1) + \Psi_1 + \Psi_2 \right] - (U_\phi + U_0) e^{-\beta_0(t-t_1)} \cos \omega_2(t-t_1),$$

здесь $\beta_2 = \frac{R_0}{2L_0}$ – декремент затухания низкочастотных колебаний напряжения;

$$R_0 = R'_K + \frac{R}{3};$$

$$R'_K = \frac{\omega_{0K}^2 L_K^2 R_3}{\omega_{0K}^2 L_K^2 + R_3^2} \text{ – активное сопротивление}$$

преобразованного параллельного соединения катушки и резистора в последовательное;

$L_K \approx L'_K$ – индуктивность преобразованного параллельного соединения катушки и резистора в последовательное;

$$\omega'_{0K} = \sqrt{\omega_{0K}^2 - \beta_2^2} \approx \omega_{0K};$$

$$\omega_{0K} = \frac{1}{\sqrt{3L_0 C}} \approx \frac{1}{\sqrt{3L'_K C}} \text{ – собственная частота сети с катушкой;}$$

$$Z_N = \sqrt{(\omega'_{0K} L_K)^2 + R'^2_K} \text{ – полное сопротивление в нейтрали трансформатора;}$$

$$\Psi_1 = \arctg \frac{B_2}{B_1};$$

$$B_1 = \frac{1}{L_0 \omega_{0K}} \left(\frac{R_0}{2} U_\phi + R_3 U_0 \right);$$

$$B_2 = -U_\phi;$$

$$\Psi_2 = \arctg \frac{\omega'_{0K} L'_K}{R'_K}.$$

В сети с данным режимом нейтрали при каждом повторном зажигании дуги часть зарядов линии стекает в землю и происходит постепенное снижение смещения нейтрали от одной попытки гашения к другой. После успешного гашения дуги будет происходить медленное восстановление напряжения на поврежденной фазе.

Отличительной особенностью сети с дугогасящим реактором и высокоомным резистором в нейтрали является то, что коэффициент затухания свободной составляющей будет больше, и, следовательно, свободная составляющая затухает быстрее. Максимальное восстанавливающееся напряжение на поврежденной фазе при наличии в нейтрали трансформатора активного

сопротивления и индуктивности значительно ниже, чем при наличии в нейтрале только катушки индуктивности при одинаковой степени настройки компенсации. Следовательно, включение высокоомного резистора параллельно ДГР снижает перенапряжения в сети при расстройке дугогасящего реактора (а также при несимметричных режимах, сопровождающихся резонансными перенапряжениями).

Поскольку условия возникновения перемежающейся дуги и характер процесса в отдельные отрезки времени при реальных замыканиях на землю в сетях 6–10 кВ могут с той или иной степенью приближения соответствовать теоретическим, то необходимо экспериментальное исследование процессов. На подстанции “Ново-Южная” (г. Бишкек) была выполнена экспериментальная оценка влияния резистивного устройства заземления нейтрали на уровни перенапряжений при дуговых однофазных замыканиях на землю.

Оценка кратности перенапряжений при металлических и дуговых однофазных замыканиях на землю проведена в следующих случаях:

- а) нейтраль изолированная;
- б) нейтраль заземлена через дугогасящую катушку;
- в) нейтраль заземлена через резистивное устройство;
- г) нейтраль заземлена через дугогасящую катушку и резистивное сопротивление.

Анализ экспериментальных данных показал:

1. При отсутствии резистивного сопротивления в момент возникновения дугового замыкания кратность перенапряжений на неповрежденных фазах составляет $2,04 \div 2,72$ при включенном дугогасящем реакторе и $2,03 \div 2,33$ при отключенном реакторе.

2. При заземлении нейтрали через резистивное устройство кратности перенапряжений на неповрежденных фазах при дуговом замыкании находятся в пределах: $1,62 \div 1,86$ при включенном реакторе и $1,23 \div 1,86$ при отключенном реакторе.

Полученные результаты свидетельствуют о более высокой эффективности резистивного устройства как средства ограничения перенапряжений при дуговых однофазных замыканиях на землю по сравнению с дугогасящими реакторами.

Феррорезонансные перенапряжения при однофазных замыканиях на землю

Однофазные замыкания на землю в сетях 6–35 кВ могут представлять большую опасность

для установленных в данных сетях трансформаторов напряжения (ТН) типов НТМИ и ЗНОМ из-за возможности возникновения феррорезонансных процессов (ФП), сопровождающихся повышениями напряжений фаз и нейтрали.

Возможность возникновения и существования феррорезонансных процессов в цепях с трансформаторами напряжения определяются следующими тремя условиями:

1. Величина эквивалентной ёмкости сети ($C_{э\text{кв}}$) должна находиться в пределах, определяемых пределами изменения индуктивности трансформатора напряжения [3], т.е.

$$\frac{1}{\omega^2 \cdot L_{xx}} \leq C_{э\text{кв}} \leq \frac{1}{\omega^2 \cdot L_S},$$

где L_{xx} – индуктивность холостого хода (х.х.), G_n ; L_S – индуктивность насыщения, G_n ; ω – угловая частота напряжения сети, $1/c$.

2. Феррорезонансный процесс возбуждается в контуре с резонансными параметрами после скачка напряжения в том случае, если суммарный поток в магнитопроводе трансформатора напряжения окажется больше потока начального насыщения магнитопровода, так как это вызывает насыщение магнитопровода и главное – плавное изменение индуктивности. Ток в первичной обмотке трансформатора напряжения при резонансе резко возрастает. Таким событием является отключение металлического однофазного замыкания на землю, при котором напряжение на трансформаторе напряжения скачком изменяется от линейного значения до фазного. Феррорезонанс в сети 6–10 кВ может возникнуть даже при номинальном уровне напряжения в сети. В сети 35 кВ феррорезонанс может возникнуть при отключении металлического замыкания на землю, если напряжение в сети будет на 5% выше номинального и отключение короткого замыкания происходит в момент максимума потока в магнитопроводе.

3. Величина энергии, поступившей в феррорезонансный контур при каждом изменении индуктивности трансформатора напряжения, должна быть больше величины потерь в нём. Частота свободных колебаний тока в параметрическом контуре определяется исключительно параметрами L , C и R контура. Если активное сопротивление мало по сравнению с волновым сопротивлением контура, то собственная частота зависит только от индуктивности и ёмкости и совпадает с его резонансной частотой. По мере увеличения активного сопротивления собственная частота уменьшается, при значении актив-

ного сопротивления, превышающем в два раза волновое сопротивление контура, собственная частота становится равной нулю и возникновение резонансных колебаний становится невозможным.

Для практической проверки изложенных выше механизмов воздействия сверхтоков на первичные обмотки трансформаторов напряжения и исследования эффективности различных защитных средств от повреждения ЗНОМ-35 при феррорезонансе, были организованы и проведены электросетевые испытания [6].

В процессе испытаний выполнялись искусственные замыкания двух видов:

- металлические однофазные замыкания на землю (ОЗЗ);
- дуговые однофазные замыкания на землю (ДОЗЗ).

При проведении испытаний проверялись два способа защиты ЗНОМ-35 от возникновения ФП:

- включение в обмотку разомкнутого треугольника ЗНОМ-35 защитного сопротивления;
- включение в нейтраль силового трансформатора защитного активного сопротивления ЗАС-35.

Результаты электросетевых испытаний подтвердили существование двух механизмов воздействия феррорезонансных процессов на фазные обмотки трансформаторов напряжения типа ЗНОМ-35, сопровождаемых длительным протеканием сверхтоков. Первый механизм – возникновением устойчивого резонанса после отключения ОЗЗ как металлического, так и дугового. В этом случае токи в обмотках трансформатора напряжения достигают $1,6 A$, и длительное существование этого процесса неизбежно должно приводить к термическому повреждению обмоток. Второй механизм, опасный для обмоток ТН, имеет место только в период существования однофазного замыкания на землю с перемежающейся дугой, когда феррорезонансный процесс и, соответственно, сверхтоки в обмотках носят преходящий характер и существуют только на время переходного процесса при прерывании дуги замыкания. Зарегистрированные токи в фазах ЗНОМ-35 достигали уровня $0,6 A$. Термическое воздействие такого процесса на обмотку ТН определяется уровнем тока, частотой случаев и длительностью его протекания.

Испытания показали, что включение активного сопротивления в цепь разомкнутого треугольника вторичной обмотки трансформатора напряжения обеспечивает гашение резонансного

процесса только первого вида при очень малых емкостных токах замыканий на землю. Полное предотвращение возникновения устойчивых феррорезонансных процессов и ограничение токов в обмотках ТН достигается включением активного сопротивления в нейтраль сети 35 кВ, обеспечивающим протекание активного тока при ОЗЗ, равного $(0,6 \div 1,0)$ емкостного тока.

Получено выражение для определения восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе в сети с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор и высокоомный резистор. Максимальное значение восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе при наличии в нейтрале трансформатора активного сопротивления и индуктивности значительно ниже, чем при наличии в нейтрале только катушки индуктивности при одинаковой настройке степени компенсации.

Экспериментальные исследования показали, что в сетях с заземленной через активное сопротивление нейтралью, кратность перенапряжений при однофазных замыканиях на землю не превышает значения 2,5. Наличие в нейтрале высокоомного резистора является эффективным средством предотвращения феррорезонансных процессов, способствует ликвидации многократных сверхтоков в обмотках измерительных трансформаторов и трансформаторов контроля изоляции, исключая, тем самым, их термическое повреждение.

Литература

1. Евдокунин Г.А., Титенков С.С. Внутренние перенапряжения в сетях 6–35 кВ. – СПб., 2004.
2. Техника высоких напряжений / Под ред. Д.В. Разевига. – М.: Энергия, 1976.
3. Халилов Ф.Х., Евдокунин Г.А., Таджибаев А.И. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений. – СПб, 2002.
4. Цапенко Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
5. Зихерман М.Х., Левковский А.И. Резонансные процессы в сетях 35 кВ с трансформаторами напряжения // Электрические станции. – 1996. – №5.
6. Мезгин В.А., Симаков Ю.П. Проведение промышленных испытаний опытного образца устройства для заземления нейтрали в электрических сетях 6–10 кВ ЗАС–10 на ПС “Ново-Южная” / Отчет по НИР; Кырг. научно-технический центр “Энергия”. – Бишкек, 1998.