

А.В. Акулов

(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ПОЛНОГО ТОКА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6 – 10 кВ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Введение

Замыкания на землю в распределительных сетях открытых горных работ, учитывая особенности эксплуатации сетей и электрооборудования, представляют опасность как для электрооборудования, так и для обслуживающего персонала.

Замыкания на землю – несимметрический вид повреждения и характеризуются появлением в сети составляющих нулевой последовательности. Параметры напряжения и тока нулевой последовательности в переходном и установившемся режимах зависят от многих факторов, определяющими из которых следует считать вид замыкания на землю и режим работы нейтрали сети.

Опасность однофазных замыканий сопряжена с воздействием на фазную изоляцию повышенного напряжения, включая и появляющиеся при этом значительные перенапряжения, кот при металлическом замыкании могут достигать 1,73 от величины фазного напряжения. Векторная диаграмма на рис. 1 наглядно отображает распределение фазных напряжений при замыкании на землю.

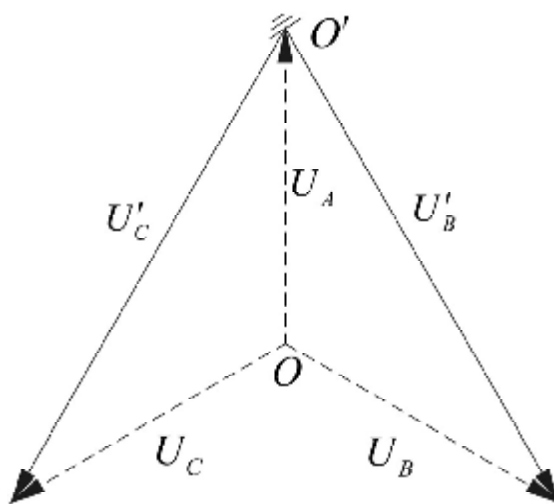


Рис. 1. Векторная диаграмма напряжений сети при однофазном замыкании на землю

По характеру повреждений следует различать металлические (глухие) замыкания на землю, дуговые (через перемежающуюся дугу) и через переходные сопротивления в точках повреждения.

Однофазные замыкания на землю или на корпус появляются вследствие механического повреждения или электрического пробоя изоляции одной из фаз сети относительно земли или корпуса.

С точки зрения электробезопасности, такие повреждения представляют значительную опасность за счет появления на корпусах электрооборудования опасных потенциалов (особенно при дуговых замыканиях), кроме того, резко возрастает вероятность появления наиболее опасных двойных замыканий на землю [4 – 6].

Выполненный анализ эксплуатационных данных об аварийности карьерных распределительных сетей показывает, что на долю замыканий на землю приходится до 60 – 90 % всех повреждений.

Компенсация емкостных токов однофазного замыкания на землю, широко применяемая в настоящее время с целью повышения надежности электрических сетей напряжением 6, 10 кВ, позволяет уменьшить ток в месте повреждения до уровня активной составляющей и высших гармоник и тем самым ликвидировать аварию в электрической сети.

Опыт эксплуатации электрических сетей с автоматической компенсацией емкостных токов показывает, что при токах однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) до 100 А доля замыканий, переходящих в междуфазные короткие, не превышает 3 – 5 % [2]; при токах ОЗЗ более 100 А эта доля возрастает и при 300 – 400 А и более практически каждое второе однофазное замыкание на землю переходит в междуфазное короткое. Поэтому компенсация только одной емкостной составляющей не является достаточным условием надежной работы электрических сетей при больших токах однофазного замыкания на землю. По данным исследований, приводимых в [3] среднее значение тока однофазного замыкания на землю в электрических сетях напряжением 6, 10 кВ составляет 125 А, а в отдельных электрических сетях (около 5 % от общего числа сетей) достигает 400 – 500 А. Следует отметить, что в связи с развитием кабельных сетей это в перспективе, ведет к увеличению среднего значения тока ОЗЗ. Поэтому следует для повышения надежности электрических сетей предусматривать компенсацию активной составляющей и высших гармоник остаточного тока ОЗЗ. При значительной величине тока однофазного замыкания (около 200 А и выше), некомпенсированное значение тока тоже возрастает и сохраняется опасность перехода однофазного замыкания в двойное на землю или короткое междуфазное.

Как показывает практика работы, значения некомпенсированного тока достаточно для горения перемежающейся дуги и дальнейшего развития аварии. Если учесть, что наиболее значимым источником высших гармоник являются потребители с нелинейной нагрузкой и мощность их постоянно растет, возникает необходимость в разработке системы автоматической компенсации высших гармоник тока замыкания.

На рис. 2 изображена осциллограмма перехода однофазного замыкания на землю в двойное.

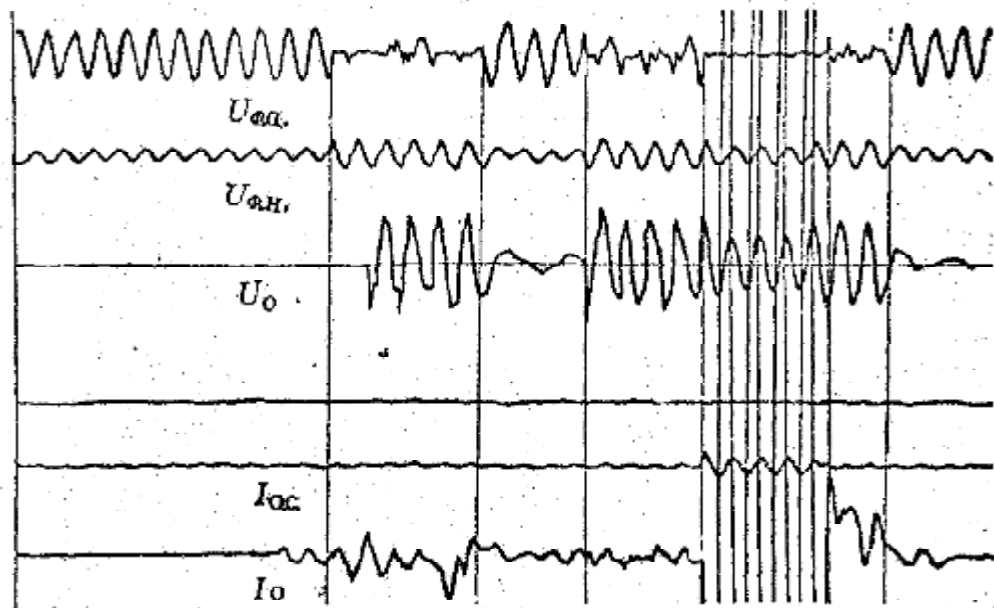


Рис. 2. Осциллограмма перехода однофазного замыкания на землю в двойное

Общие понятия по расчету ОКЗ

Для построения схемы замещения и последующего расчета токов замыкания на землю в установившемся режиме приняты следующие допущения [1, 3]:

1. В нормальном режиме работы трехфазная система является симметричной.
2. Нагрузкой, подключенной к линиям распределительной сети, пренебрегаем.
3. Напряжения фаз сети относительно земли являются одинаковыми в любой точке сети.
4. Распределенные параметры изоляции сети относительно земли заменяем сосредоточенными.
5. Индуктивность и активное сопротивление обмоток питающего силового трансформатора также равны нулю.
6. Междофазные емкости сети не учитываются.
7. Индуктивность компенсирующего устройства не зависит от значения приложенного напряжения.
8. Активные потери компенсирующего устройства имитируются активной проводимостью, включенной параллельно индуктивности компенсирующего устройства, и переходное сопротивление в точке замыкания фазы на землю является чисто активным.

На основании принятых допущений, схема замещения распределительной сети для исследования аварийных токов будет иметь вид представленной на рис. 3.

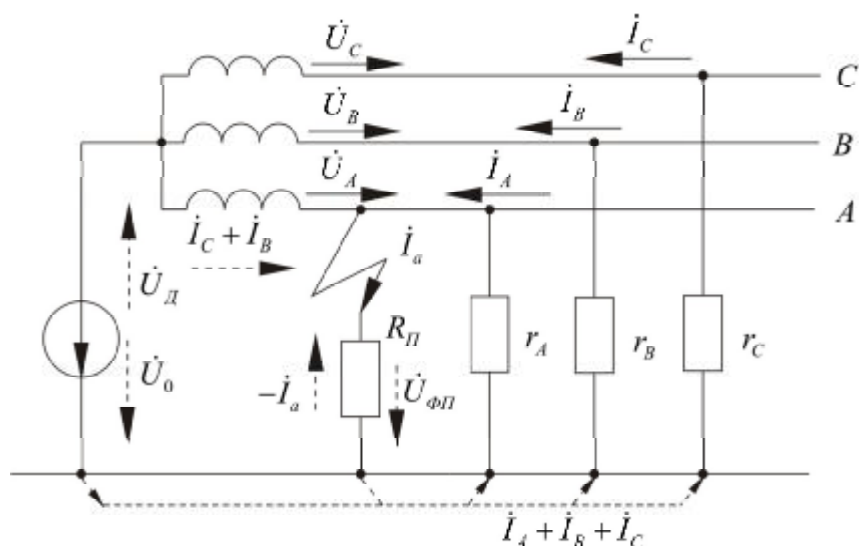


Рис. 3. Схема замещения распределительной сети для исследования аварийных токов

Принимая во внимание, что система является симметричной, т.е.

$$Y_A = Y_B = Y_C = Y . \quad (1)$$

В общем виде выражение для тока однофазного замыкания на землю в сети с полностью изолированной нейтралью запишется так:

$$\mathcal{I}_3 = -3U_0 Y = 3U_\Phi Y \frac{y}{3Y + y} . \quad (2)$$

Общее выражение для тока однофазного замыкания на землю электрической сети с компенсированной нейтралью:

$$\mathcal{I}_3 = U_\Phi \frac{3Y y}{3Y + Y_H + y} + U_\Phi \frac{Y_H y}{3Y + Y_H + y} = \mathcal{I}_{3C} + \mathcal{I}_{3K} . \quad (3)$$

Из последнего выражения видно, что ток однофазного замыкания на землю в сети с компенсированной нейтралью в общем случае состоит из двух составляющих: 1) \mathcal{I}_{3C} – ток, обусловленный проводимостью изоляции относительно земли всей электрически связанной сети; 2) \mathcal{I}_{3K} – ток, обусловленный проводимостью компенсирующего устройства.

Компенсация активной составляющей

На сегодняшний день существует два основных принципа компенсации активной составляющей тока однофазного замыкания на землю. Первый из них основан на создании искусственной несимметрии в сети, а другой – на введе-

нии в сеть дополнительного напряжения. Для их реализации известен ряд статистических устройств, которые подключаются к элементам сети:

- к отстающей фазе подключается дополнительная емкость ΔC [2, 3];
- к опережающей фазе подключается индуктивность ΔL [2, 3];

– в нейтраль через дугогасящий реактор или однофазный трансформатор вводится дополнительное напряжение \dot{U}_D , совпадающее с фазным напряжением поврежденной фазы [2] либо опережающее его на определенный угол [3].

Достоинством пассивного способа компенсации является то, что он может быть сравнительно просто реализован в электрических сетях напряжением до 1000 В. Однако его использование в сетях напряжением 6, 10 и 35 кВ весьма проблематично.

Способ, основанный на включении дополнительного источника к нейтрали компенсирующей сети, лишен этого недостатка, преимуществом его также является простота регулирования величины вводимого напряжения. К недостаткам следует отнести влияние устройства компенсации активной составляющей на настройку дугогасящего реактора.

Компенсацию активной составляющей тока замыкания следует осуществлять при больших значениях полного тока замыкания на землю.

Рассмотрим схему замещения трехфазной сети, показав только процесс протекание активной составляющей в режиме однофазного замыкания на землю (рис. 4).

При однофазном замыкании на землю на нейтрали сети появляется напряжение \dot{U}_0 , обусловленное фазными напряжениями сети $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ и вводимым напряжением \dot{U}_D . Замыкание на землю эквивалентно включению в месте повреждения источника, напряжение которого по величине равно напряжению поврежденной фазы $\dot{U}_{\Phi\Pi}$ и противоположно по направлению.

После в месте замыкания появляется активная составляющая тока замыкания на землю \dot{I}_A , для компенсации которой используется величина $-\dot{I}_A$.

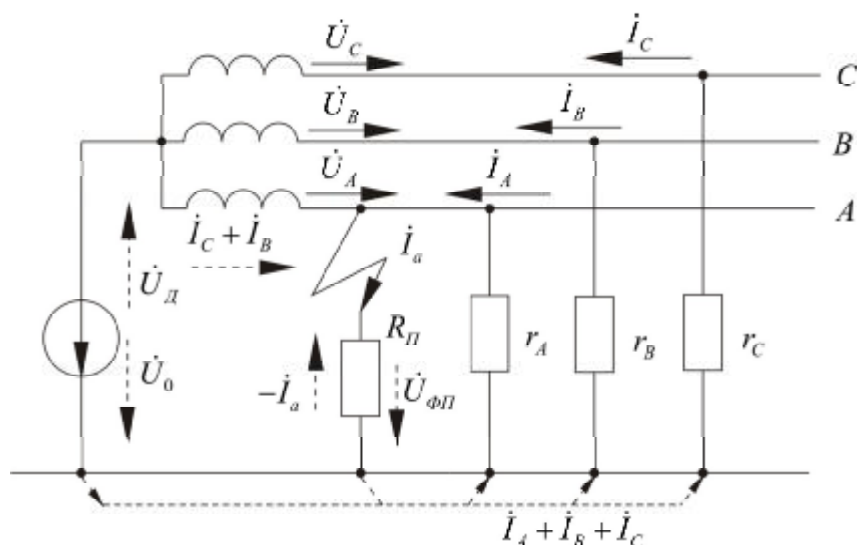


Рис. 4. Схема процесса компенсации активной составляющей в трехфазной сети

Условием точной компенсации является равенство напряжения нейтрали U_0 и фазного напряжения поврежденной фазы $U_{ФП}$. В этом случае через переходное сопротивление замыкания $R_{П}$ будет протекать только ток, обусловленный наличием высших гармоник. Для восстановления нормального режима работы компенсированной сети после отключения или самоликвидации замыкания на землю необходимо уменьшать до нуля величину вводимого напряжения $U_{Д}$. При этом будет уменьшаться напряжение нейтрали U_0 и будут восстанавливаться напряжения относительно земли на поврежденной и неповрежденных фазах.

При контроле активной составляющей сопротивления хорошо себя зарекомендовал способ определения активной составляющей сопротивления изоляции относительно земли с помощью наложения на сеть двух сигналов промышленных частот.

Гармонические составляющие тока ОКЗ

Помимо основной частоты в поврежденной сети возникают дополнительные составляющие токов высших гармоник.

При замыкании на землю емкости проводов неповрежденных фаз по отношению к земле включаются на линейное напряжение. Это определяет высокий уровень высших гармонических в токе замыкания на землю, проходящих через емкости, так как емкости являются для них более низким сопротивлением, чем для токов основной частоты. В случае замыкания фазы на землю ток замыкания на землю зависит от ЭДС эквивалентного генератора, которая равна напряжению фазы в точке повреждения в предыдущем режиме. Схема замещения распределительной сети показана на рис. 5

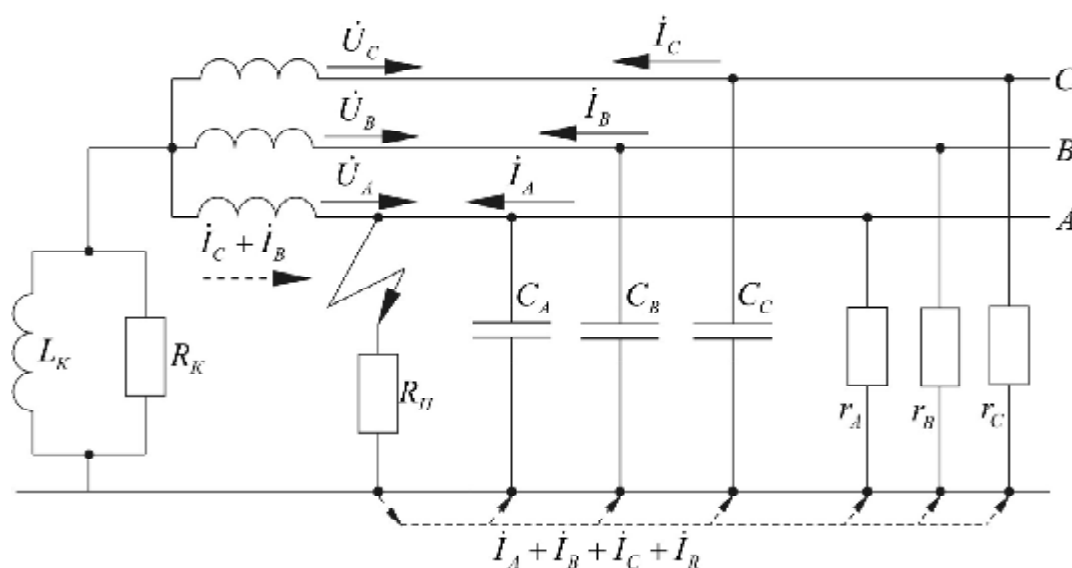


Рис. 5. Схема распределительной сети с компенсированной нейтралью при ОЗНЗ через переходное сопротивление

Единственным источником естественных гармоник тока замыкания на землю, которые должны приниматься во внимание, являются искажения напряжения фазы в точке повреждения при разомкнутой цепи нулевой последовательности, создаваемые нагрузками потребителей с нелинейными характеристиками. Естественный ток каждой гармоники ν -го порядка, замыкающийся в месте повреждения

$$I_{\nu 1} = \frac{U'_{\phi \nu 1}}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{3C\omega\nu^2}}} = \frac{I_c U'_{\phi \nu 1 \nu}}{U_{\phi \nu 1} \sqrt{\left(\frac{R\nu}{X_c}\right)^2 + 1}}. \quad (4)$$

где $U'_{\phi \nu 1}$ – совокупность возможных гармоник напряжения; I'_c – составляющая рабочей частоты собственного емкостного тока линии при отсутствии на ней повреждения (в этих выражениях $X_c = \frac{1}{3C\omega}$).

Во всех случаях при наложении высших гармоник напряжения или тока они складываются со слагающей основной частоты в квадратуре, т.е. получающееся в результате сложения действующее значение равно корню квадратному из суммы квадратов всех составляющих разных частот.

Отсюда следует, что даже относительно небольшая гармоника напряжения может вызвать значительную составляющую тока замыкания на землю. Если, например, в фазном напряжении содержится девятая гармоника, равная всего 2 % этого напряжения, то она вызывает соответствующую гармонику тока, равную 17,8 % емкостного тока основной частоты. Кроме рассмотренной методики существуют и другие способы определения уровня высших гармонических в токе замыкания на землю.

Особенностью протекания высших гармоник в сетях являются:

- нестабильность токов высших гармоник во времени в зависимости от режима работы сети, напряжения, характера нагрузки, режима компенсации, что приводит к необходимости постоянного контроля компенсирующим устройством;
- различный уровень при замыкании на землю через переходное сопротивление.

Вывод

При резонансной настройке компенсированной сети остаточный ток замыкания состоит из активной составляющей (5–10 % полного тока замыкания I_3) и высших гармоник, доля которых обычно составляет порядка 5 % I_3 . Поэтому в электрических сетях с током однофазного замыкания на землю 150–200 А и выше остаточный емкостной ток имеет значительную величину и

сохраняется опасность перехода однофазного замыкания в двойное замыкание на землю или короткое междуфазное.

С точки зрения электробезопасности компенсированные сети при непосредственном прикосновении к токоведущим частям представляют практически такую же опасность, как и сети с изолированной нейтралью даже в резонансном режиме настройки компенсирующего устройства. Это объясняется тем, что в компенсированной сети в момент замыкания через тело человека пройдет значительный и достаточно медленно затухающий свободный ток компенсирующего устройства, носящий периодический характер.

Расстройка режима компенсации более 5% от резонансного приводит к резкому снижению эффективности в части кратности перенапряжений, развития феррорезонансных процессов т. п. При расстройке режима компенсации на 20 % от резонансного преимущества компенсированных сетей по сравнению с изолированными практически сводятся к нулю.

Следует однако отметить, что в случаях, когда используются неправильные схемы присоединения устройств компенсации емкостных токов (дугогасящих аппаратов) и допускаются неправильные оперативные и автоматические действия, компенсация емкостных токов замыкания на землю не только утрачивает частично или полностью свою эффективность, но и становится причиной множественных повреждений изоляции сети. Опасные для изоляции сети по уровню и длительно действующие феррорезонансные перенапряжения возникают в случаях, когда трансформатор или генератор с устройством компенсации емкостных токов оказывается подключенным к сети не всеми фазами [3, 4].

При использовании существующих методов компенсации тока однофазного замыкания на землю высокого эффекта не достигается из-за пренебрежения высшими гармоническими составляющими. Но значение этих составляющих постоянно возрастает благодаря внедрению на предприятиях элементов с нелинейной вольт-амперной характеристикой (силовые тиристоры, приборы автоматической сварки, и т.п.).

Если осуществить одновременную компенсацию емкостной, активной и высших гармонических составляющих, то остаточный ток будет иметь значение около 1–1,5% тока замыкания на землю.

Компенсацию активной и высших гармонических составляющих тока однофазного замыкания на землю целесообразно рассматривать только при наличии емкостной составляющей. Компенсацию активной составляющей тока ОЗЗ можно осуществить путем введения в сеть через нейтраль дополнительного напряжения либо путем создания искусственной несимметрии. Проведенные исследования выявили следующие основные преимущества первого способа компенсации:

- устройства компенсации активной составляющей оказывают меньшее влияние на настройку по реактивной составляющей тока замыкания на землю;
- регулирование параметров, в частности вводимого в сеть напряжения, проще чем регулирование емкостной или индуктивной проводимостей элементов, подключаемых к фазам сети;
- обеспечивается более высокая надежность электрической сети, так как конденсаторные установки чувствительны к перенапряжениям, а под-

ключение дополнительных реакторов создает опасность возникновения феррорезонансных процессов в электрической сети.

Проведенный теоретический анализ показал, что введение компенсации активной составляющей тока ОЗЗ улучшает установившиеся и переходные процессы, протекающие в электрической сети при однофазных замыканиях на землю.

Список литературы

1. Бухтояров В.Ф. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров. – М.: Недра, 1986. – 184 с.
2. Ершов А.М. Способы компенсации активной составляющей тока однофазного замыкания на землю / А.М. Ершов, О.А. Петров // Изв. вузов. Энергетика. – 1977. – №3. – С. 15–19.
3. Петров О.А. Компенсация активной составляющей тока однофазного замыкания на землю в электрических сетях / А.М. Ершов, О.А. Петров // Изв. вузов. Энергетика. – 1975. – №10. – С. 52–59.
4. Самойлович И.С. Режимы нейтрали электрических сетей карьеров. – М.: Недра, 1976. – 175 с.
5. Сирота И.М. Влияние режимов нейтрали в сетях 6–35 кВ на условия безопасности / И.М. Сирота // Режимы нейтрали в электрических системах. – К.: Наукова думка, 1974. – С. 84–104.
6. Принципы выполнения и устройства защиты и сигнализации замыкания на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ: тез. докл. научн.-техн. конф. "Релейная защита и автоматика" / РАО и ЦДУ ЕЭС России. – М.: РАО и ЦДУ ЕЭС России, 1998. – С. 147–150.