

Кобазев В.П.

Донецкий государственный технический университет

c12@elf.dgtu.donetsk.ua

The article dealt with the performance of the appliance designed for monitoring the integrity of the neutral conductor in the 0.38 kV headline. The monitoring is carried out by measuring the symmetry of the auxiliary currents at the frequency of 100 Hz. The mentioned currents are measured at sending end of the line, the energy sources are inserted at the receiving end of the same line.

Статистика несчастных случаев из-за обрыва проводов воздушных линий 0,38 кВ свидетельствует о значительном числе поражений электрическим током. Сведения [1] об электротравматизме, указывают на повышенную опасность обрыва и провисания проводов воздушных линий и внутренних проводок. В них произошло 4,9 % электротравм. Отмечается что в 94,3 % случаев травмы произошли из-за непосредственного прикосновения к оборвавшимся или провисшим проводам. Кроме того, упоминается о фактах, когда оборвавшийся, но не обесточенный провод находился на земле в течении нескольких дней и даже недель из-за несовершенства технических средств контроля исправности проводов воздушных линий. Поэтому применительно к таким сетям предложен способ контроля обрыва проводов при помощи наложения на сеть токов не промышленной частоты источниками, установленными в конце линии [2].

Проанализируем работу схемы, изображённой на рис.1, при источниках контрольного тока 100 Гц, состоящих из последовательно соединённых диодов VD1, VD2 и резисторов R₁, R₂.

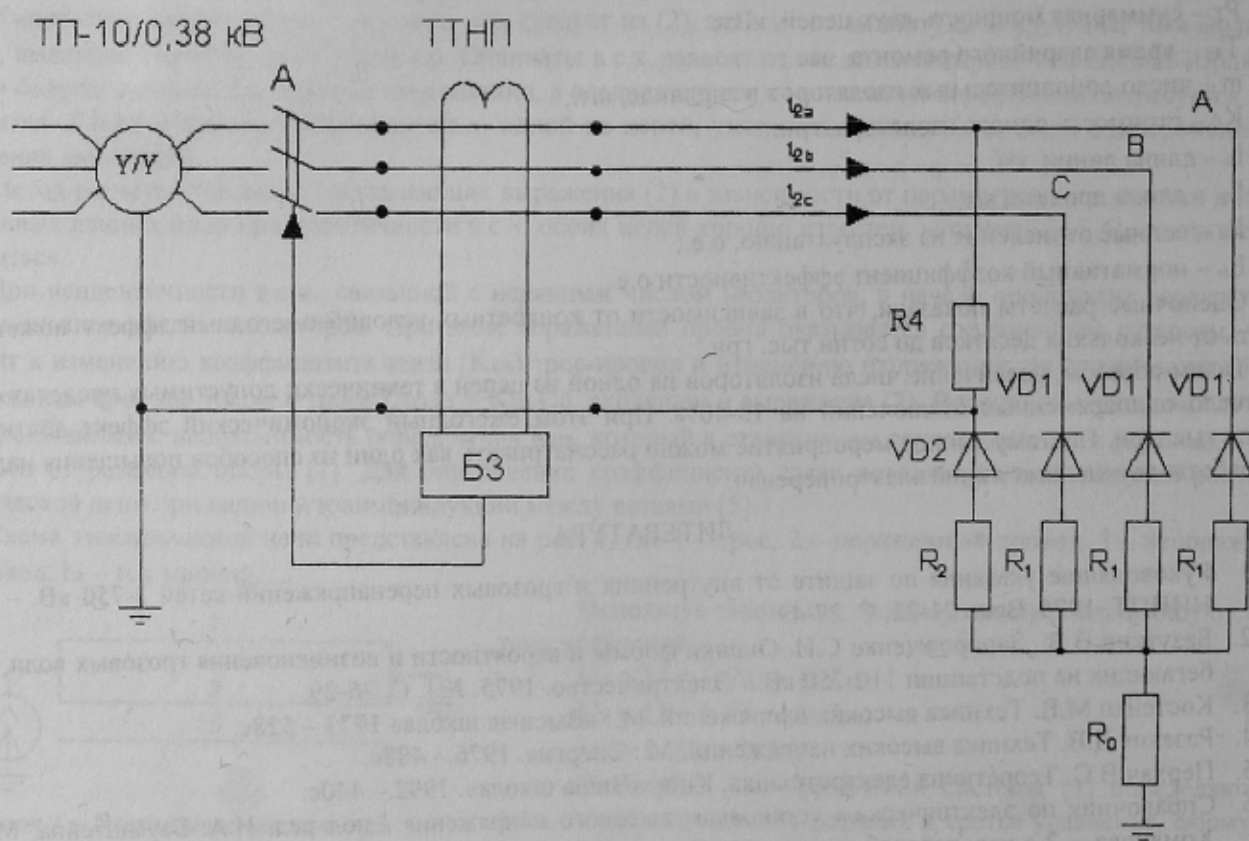


Рисунок 1- Функциональная схема контроля исправности нулевого провода.

При подключении диода и резистора к источнику синусоидального напряжения в цепи протекают полуволны выпрямленного тока. Если ось ординат проходит через максимум функции, то на сегменте $[-\pi/2, \pi/2]$ ток изменяется по косинусоиду. Вторая гармоника этого тока равна получим:

$$I_{2m} = \frac{2 \cdot I_m}{3 \cdot \pi} = 0,212 \cdot I_m.$$

Для схемы изображённой на рис.1 амплитуда тока равна:

$$I_m = \frac{U_m}{R_1 + R_2}.$$

С учётом того, что фазы напряжения на источнике тока второй гармоники совпадают и напряжения сдвинуты друг относительно друга на 120 эл. град. получим выражения для контрольного тока фаз. Совместим напряжение фазы А с полуосью вещественных чисел. Тогда выражения для определения мгновенных токов в фазных проводах ВЛ 0,38 кВ имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} i_{2A} &= \frac{2I_m}{3\pi} \cos 2\omega \cdot t \\ i_{2B} &= \frac{2I_m}{3\pi} \cos 2(\omega \cdot t - 120^\circ) = \frac{2I_m}{3\pi} \cos \cdot (2\omega \cdot t + 120^\circ) \\ i_{2C} &= \frac{2I_m}{3\pi} \cos 2(\omega \cdot t + 120^\circ) = \frac{2I_m}{3\pi} \cos \cdot (2\omega \cdot t - 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Из полученных выражений следует, что ток i_{2B} опережает ток i_{2A} на угол 120° , а ток i_{2C} отстает от тока i_{2A} на такой же угол. В результате все три тока образуют симметричную трёхфазную систему токов. В нормальном режиме сумма мгновенных значений этих токов равна нулю.

Кроме второй гармоники, в токе выпрямительной цепи диод-резистор имеется постоянная составляющая. Если ось ординат проходит через точку максимума функции, то имеем:

$$I_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_m \cdot \cos x \cdot dx = \frac{U_m}{\pi \cdot (R_1 + R_3)}$$

Ток I_0 , проходя через резистор R_3 , создаёт на нём падение напряжения. Поэтому дополнительный источник тока (VD2, R_2) вводится в действие тогда, когда амплитудное значение напряжения между нулевым проводом и землёй будет меньше опорного

$$U_{on} = 3I_0 \cdot R_3 = \frac{3U_m \cdot R_3}{\pi \cdot (R_1 + R_3)} \approx \frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot U_m \quad (2)$$

Обозначим отношение U_{on}/U_m символом U_{on}^* . Из (2) найдём величину сопротивления резистора R_3 :

$$R_3 = \frac{U_{on}^*}{1 - U_{on}^*} \cdot R_1 \quad (3)$$

Выражение (3) имеет физический смысл тогда, когда $U_{on}^* < 1$. Сопротивление резистора R_3 должно обеспечить в нормальном режиме работы линии запирающее действие диода VD2 дополнительного источника тока.

Сопротивление резистора R_2 выбираем таким, чтобы входное реле блока защиты срабатывало при появлении между нулевым проводом и землёй опасного для человека напряжения. Это произойдёт тогда, когда дополнительный источник создаст в проводах линии при обрыве нулевого провода такой же ток, как и основной источник при обрыве фазного провода:

$$\frac{U_{уст} - U_{on}^*}{R_2 + R_3} = \frac{I}{R_1 + R_3} \quad (4)$$

где $U_{уст}$ — относительное напряжение между нулевым проводом и землёй при срабатывании защиты.

Решив уравнение (4) относительно R_2 с учётом выражения (3) имеем:

$$R_2 = \frac{U_{уст} - 2 \cdot U_{on}^*}{1 - U_{on}^*} \cdot R_1 \quad (5)$$

Для обеспечения контроля обрыва нулевого провода при отсутствии нагрузок за местом обрыва между фазой А (или любой другой фазой сети) можно присоединить резистор R_4 . В этом случае к фазе А будут подключены две выпрямительные цепи диод-резистор: VD1, R_1 и VD2, R_2 , R_4 , связанные через резистор R_3 с землёй. Из условия равенства токов в цепях имеем:

$$\frac{U_m}{R_4 + R_2 + R_3} = \frac{U_m}{R_1 + R_3}, \text{ или } R_1 + R_3 = R_4 + R_2 + R_3.$$

Откуда с учётом (5) можно определить сопротивление резистора R_4 :

$$R_4 = R_1 - R_2 = \frac{1 - U_{ycm} + U_{on}}{1 - U_{on}} R_1. \quad (6)$$

В процессе эксплуатации линии 0,38 кВ довольно часто возникают одновременные обрывы в одном пролёте фазных и нулевых проводов из-за падения на провода веток деревьев, перевозки крупногабаритных грузов и т.п. В этом случае суммарный ток на частоте 100 Гц определяется действием основного и дополнительного источников.

При обрыве фазы А одновременно с нулевым проводом и отсутствии нагрузок за местом обрыва контрольный ток основного источника на частоте 100 Гц, действующий на блок защиты, определяется действием цепей диод-резистор фаз В и С линии. Из (2.1) найдём суммарный ток по соотношению:

$$i_{\Sigma} = i_{2B} + i_{2C} = \frac{2 \cdot I_m}{3 \cdot \pi} \cos(2\omega \cdot t).$$

При совместном обрыве провода фазы В (или фазы С) и нулевого провода ток 100 Гц в фазе при отсутствии за местом нагрузок генерируется двумя цепями диод-резистор. Выпрямительная цепь дополнительного источника подключена к фазе А через резистор R_4 . Параметры резисторов таковы, что амплитуда тока второй гармоники в проводе фазы А равна:

$$\frac{4 \cdot I_m}{3 \cdot \pi} = 2 \cdot I.$$

Поскольку сдвиг в фазе между контрольными токами неповреждённых проводов равен 120° , то амплитуда суммарного тока действующего на блок защиты определяется выражением:

$$I_{\Sigma} = \sqrt{(2 \cdot I)^2 + I^2 + 2 \cdot 2 \cdot I \cdot I \cdot \cos 60^\circ} = \sqrt{3} \cdot I.$$

При обрыве только одного фазного провода, например фазы А, суммарный ток будет равен:

$$I_{\Sigma} = \sqrt{I^2 + I^2 - 2 \cdot I \cdot I \cdot \cos 60^\circ} = I.$$

Таким образом, при обрыве фазы С (или В) и нулевого провода на блок защиты будет действовать ток I_{Σ} в $\sqrt{3}$ раз больше I_{Σ} , появляющегося лишь при обрыве только провода фазы А.

При одновременном обрыве провода фазы А и нулевого провода и наличии нагрузок за местом обрыва вектор напряжения определяется соотношением сопротивлений нагрузок в фазах В и С. Рассмотрим самый неблагоприятный случай совместного действия основного и дополнительного источников тока когда нагрузки в фазах В и С одинаковы. Учитывая нулевой сдвиг тока второй гармоники относительно напряжения, U_0 получим:

$$i_{2don} = \frac{2I_m \delta_{on}}{3\pi} \cos 2\omega \cdot t,$$

где $I_{m, don}$ - амплитуда тока второй гармоники дополнительного источника тока.

Следовательно, при обрыве нулевого и фазного провода будет симметричная трехфазная система токов на частоте 100 Гц, поэтому блок защиты не срабатывает. Однако из-за того, что характер несимметрии непрерывно меняется и вероятность такого совпадения очень мала.

Рассмотрим случай, когда за местом обрыва между повреждённой фазой и нулевым проводом нагрузки нет, а в остальных фазах она есть. В этом случае помимо тока дополнительного источника появляется ток выпрямительного источника повреждённой фазы. Проанализируем совместный обрыв фазы А и нуля.

Амплитуда выпрямленного тока основного источника на частоте 50 Гц с учётом того, что напряжение U_0 приложено к соединённым последовательно резисторам R_1, R_4 и R_3 определяется следующим выражением:

$$I_{50} = \frac{U_m}{2 \cdot (R_4 + R_1 + R_3)}. \quad (7)$$

Из соотношений (3) и (6) определим сумму сопротивлений резисторов R_1, R_3, R_4 :

$$R_1 + R_3 + R_4 = \frac{2 - U_{ycm} + U_{on}}{1 - U_{on}} R_1. \quad (8)$$

Найдём сумму сопротивлений R_1, R_3 :

$$R_1 + R_3 = R_1 + \frac{U_{on}}{1 - U_{on}} R_1 = \frac{R_1}{1 - U_{on}}. \quad (9)$$

Используя (9), преобразуем выражение (8) к следующему виду:

$$R_4 + R_1 + R_3 = (2 - U_{ycm} + U_{on}) \cdot (R_1 + R_3). \quad (10)$$

Подставим значение суммарного сопротивления (10) в (7). Выражение для добавочного тока второй гармоники, вызванного действием основного источника, имеет вид:

$$I_{m\text{доб}} = \frac{U_m}{R_1 + R_3} \cdot \frac{2}{3 \cdot \pi} \cdot \frac{I}{2 \cdot (2 - U_{\text{ycm}} + U_{\text{он}})} \quad (11)$$

В выражении (11):

$$\frac{U_m}{R_1 + R_3} = I_m \quad \text{и} \quad \frac{2}{3 \cdot \pi} = \frac{I_{2m}}{I_m},$$

поэтому выражение (11) преобразуется к следующему виду:

$$I_{m\text{доб}} = \frac{I}{2 \cdot (2 - U_{\text{ycm}} + U_{\text{он}})} \quad (12)$$

Определим амплитуду тока дополнительного источника при $U_0 = U_m/2$ из тех соображений, что при U_{ycm} источник создаёт такой же ток, как и основной источник тока. В этом случае имеем:

$$I_{m\text{дон}} = I \cdot \left(\frac{U_m}{2U_{\text{ycm}}} \right).$$

Разделим числитель и знаменатель этого выражения на U_m .

$$I_{m\text{дон}} = \frac{I}{2 \cdot U_{\text{ycm}}} \quad (13)$$

Амплитуда тока второй гармоники, воздействующего на блок защиты, при обрыве только нулевого провода определяется по выражению (13). При совместном действии источников ток второй гармоники с учётом выражений (12) и (13):

$$I_{m\text{бз}} = I_{m\text{дон}} + I_{m\text{доб}} = \left(\frac{I}{2 \cdot U_{\text{ycm}}} + \frac{I}{2(2 - U_{\text{ycm}} + U_{\text{он}})} \right) I \quad (14)$$

Если между повреждённой фазой и нулевым проводом за местом обрыва есть нагрузка, то она шунтирует сопротивление R_4 , поэтому суммарное сопротивление будет состоять из двух сопротивлений R_1 и R_3 , а амплитуда тока станет равной $I/2$. Суммарный ток, воздействующий на блок защиты, увеличивается в

$$I_{m\text{бз}} = (2 + U_{\text{ycm}}) / (2 \cdot U_{\text{ycm}}) \text{ раз.}$$

Напряжение U_{ycm} должно быть выбрано таким, чтобы выходное реле блока защиты срабатывало при возникновении опасного по величине напряжения U_0 между нулевым проводом и землёй. При сравнительно небольших безопасных для человека напряжениях (≤ 36 В) защита не должна срабатывать, так как человек может сам освободиться от контакта с оборвавшимся проводом. Оценим приблизительно величину оперативного тока

воздействующего на блок защиты. Этот ток, вычисленный при $U_{\text{ycm}} = 36$ В ($U_{\text{ycm}} = 0,164$), равен $3,05 \cdot I$. Как было отмечено ранее, сдвиг по фазе между контрольными токами равен 120° , поэтому суммарный ток воздействующий на защиту, в самом неблагоприятном случае (при отсутствии нагрузок за местом обрыва) будет превышать в 2,05 раза номинальный контрольный ток 100 Гц.

ВЫВОДЫ

Применение дополнительного источника тока 100 Гц, включенного в конце воздушной линии между нулевым проводом и землей позволит обеспечить электробезопасность воздушных электрических сетей 0,38 кВ при обрывах не только фазных проводов и нулевых.

Из анализа вариантов взаимодействия основных и дополнительных источников тока 100 Гц следует, что обрыв нулевого провода будет обнаруживаться при всех возможных сочетаниях обрывов фазных и нулевого провода. Причем в самом неблагоприятном случае суммарный ток, воздействующий на измерительную часть блока защиты, будет превышать номинальный контрольный ток источника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев А.Д. Анализ причин повреждаемости элементов сетей напряжением до 1000 В.- Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1984, №1.- С.47-49.
2. Кобазев В.П., Ткаченко А.А. Диагностика состояния проводов ВЛ 0,38 кВ.- Сборник трудов ДонГТУ. Серия "Электротехника и энергетика" выпуск 17.- Донецк: ДонГТУ, 2000.- С.194-197.